

Aschenaggregate in vulkaniklastischen Transportsystemen

Dissertation
zur Erlangung des Grades eines
Doktors der Naturwissenschaften an der
Fakultät für Geowissenschaften
Ruhr-Universität Bochum

Rolf Schumacher

Bochum 1988



Digitized by the Internet Archive
in 2026

Aschenaggregate in vulkaniklastischen Transportsystemen

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines
Doktors der Naturwissenschaften an der
Fakultät für Geowissenschaften
Ruhr - Universität Bochum

Rolf Schumacher

Bochum 1988

Veritas filia temporis
Die Wahrheit ist Tochter ihrer Zeit

Peter Scholl-Latour
in
"Nord am großen Fluß",
DVA 1986

Veritas filia temporis

Die Wahrheit ist Tochter ihrer Zeit

Peter Scholl-Latour
in

"Mord am großen Fluß",
DVA 1986

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	5
Abstract	8
1. Einführung	12
1.1 Problemstellung und Zielsetzung	12
1.2 Stand der Forschung	13
2. Arbeitsmethoden	17
2.1 Geländearbeiten	17
2.2 Laborarbeiten	17
2.2.1 Probenaufbereitung	17
2.2.2 Siebanalyse	17
2.2.3 Schwereretrennungen	18
2.2.4 Untersuchungen zum Aufbau der Aggregate	19
2.3 Vergleichende Analysen	19
2.3.1 Vergleichssiebungen	19
2.3.2 Vergleich Ultraschallsiebung - Atterberg-Schlämmaanalyse	21
3. Vulkanologische Grundlagen	24
3.1 Eruptions- und Sedimentationsmechanismen	24
3.2 TephraKomponenten	26
3.3 Klassifizierung akkretionärer Lapilli	27
4. Fallstudie: Akkretionäre Lapilli der Laacher See Tephra	30
4.1 Vorkommen und Verbreitung	30
4.1.1 Die basale Untere Laacher See Tephra (LLST)	31
4.1.2 Die Mittlere Laacher See Tephra (MLST)	32
Der Mendiger Ablagerungsfächer	32
Der Nickenicher Ablagerungsfächer	35
4.1.3 Die Obere Laacher See Tephra (ULST)	37
Laminierte Surge-Ablagerungen	40
4.2 Aufbau, Struktur und Granulometrie akkretionärer Lapilli	46
4.2.1 Akkretionäre Lapilli der Fallout-Aschen	46
Aufbau	46
Granulometrie	47

4.2.2	Akkretionäre Lapilli der Ignimbrite	51
	Aufbau	51
	Granulometrie	55
4.2.3	Akkretionäre Lapilli der Surge-Ablagerungen	58
	Aufbau	58
	Granulometrie	58
4.3	Zusammenfassung und Interpretation	61
5.	Technische Aggregatbildung	69
5.1.	Physikalische Grundlagen der Partikelhaftung	69
5.1.1	Fuidbrückenkräfte	70
5.1.2	Elektrostatische Anziehung	72
5.1.3	Diskussion der Haftkräfte	72
5.2	Technische Granulationsverfahren	75
5.2.1	Feuchtagglomeration	75
	Rollgranulation	75
	Fluidbettgranulation	75
5.2.2	Elektrostatische Partikelanlagerung	76
5.3	Experimente zum elektrostatischen Verhalten vulkanischer Aschen	77
6.	Genese akkretionärer Lapilli der Laacher See Tephra	82
6.1	Grundlagen der Aggregatbildung in vulkanischen Aschenwolken	82
6.1.1	Feuchtigkeit aus kondensiertem Wasserdampf	82
6.1.2	Elektrostatische Felder bei explosiven Eruptionen	83
6.1.3	Zusammenfassung	84
6.2	Entstehung akkretionärer Lapilli im Bodentransport	85
6.2.1	Akkretionäre Lapilli in pyroklastischen Surges	86
6.2.2	Akkretionäre Lapilli in pyroklastischen Strömen	91
6.3	Aschenaggregate in Elutriationsaschenwolken	94
6.3.1	Verbreitung und Korngrößenverteilung der Ablagerung	94
	Das Aschesediment	97
6.3.2	Rekonstruktion des Ablagerungsprozesses	99
	Entstehung der Aschenwolke	99
	Ausgangsbedingungen der Sedimentation	99
	Aggregatbildung	101
	Sedimentation aus der Aschenwolke	103
6.3.3	Plinianischer Fallout	105

6.4	Verfestigung akkretionärer Lapilli	106
6.4.1	Blasenbildung	106
6.4.2	Zementation	107
7.	Akkretionäre Lapilli aus anderen Gebieten	109
7.1	Vorkommen, Aufbau und Granulometrie	109
7.1.1	Weiberner Tuff, Osteifel	110
7.1.2	Kos-Plateau-Ignimbrit; Tilos, Griechenland	111
7.1.3	Äolische Inseln, Italien	111
7.1.4	Mount St.Helens, USA	112
7.1.5	Uwekahuna-Asche, Kilauea, Hawaii	114
7.1.6	Wairakei Formation, Neuseeland	114
7.1.7	Soufriere Vulkan, St.Vincent	115
7.2	Vergleich mit der Laacher See Tephra	116
	Schlußfolgerungen	118
8.	Aschenaggregate in plinianischen Eruptionswolken	119
8.1	Aggregatbildung	119
8.2	Aggregatsedimentation	123
9.	Akkretionäre Lapilli als Indikatoren vulkaniklastischer Ablagerungen	128
9.1	Identifikationsschema	128
9.2	Interpretation der Aggregatführung einer Tephraschicht . . .	130
	Eruptionswolke	130
	Bodentransportsysteme	131
	Partikelgefüge	132
	Danksagung	133
	Literaturverzeichnis	134
	Anhang	140

Kurzfassung

Aufbau und Entstehung akkretionärer Lapilli aus plinianischen und phreatomagmatischen Fall-, Fließ- und Surge-Ablagerungen des Laacher See Vulkans wurden im Gelände, strukturell und granulometrisch untersucht und mit Aschenaggregaten aus anderen Gebieten verglichen.

Akkretionäre Lapilli sind konzentrisch-zonar aufgebaute Aschenaggregate, die entweder aus einem grobkörnigen Kern mit umgebender feinkörniger Rinde gebildet werden (Rinden-Typ), oder ausschließlich aus einem grobkörnigen Kern bestehen (Kern-Typ). Zwischen Kern und Rinde besteht ein deutlicher Korngrößensprung. Außerdem ändert sich in akkretionären Lapilli aus Bodentransportsystemen an der Grenze Kern/Rinde das Partikelgefüge: Im Kern sind die Aschenpartikel, die flächenförmige Kontakte bilden, dichtgepackt; in der Rinde überwiegt ein lockeres Gefüge mit punktförmigen Partikelkontakten. Die gleichen Gefügeunterschiede im bestehen auch zwischen den Kernen akkretionärer Lapilli aus Bodentransportsystemen und solchen aus windverdrifteten Aschenwolken. Aggregate mit dichtem Gefüge haben eine mittlere Dichte von 1600 kg/m^3 , diejenigen mit lockerem Gefüge von 1200 kg/m^3 .

Die Korngrößenverteilung der agglomerierten Asche ist von der Transportkapazität und der Strömungsenergie des Transportsystems abhängig. Akkretionäre Lapilli aus Surges besitzen das größte Korngrößenspektrum mit Partikeln bis ca. 2 mm. In pyroklastischen Strömen gebildete Aggregate enthalten generell nur Partikel bis wenig $> 0.35 \text{ mm}$. Akkretionäre Lapilli aus windverdrifteten Elutriationswolken lagern nur feinkörnige Asche bis ca. 0.25 mm an. In den feinkörnigen Rinden wird unabhängig vom Transportsystem ein einheitliches Korngrößenspektrum bis ca. $125 \mu\text{m}$ agglomeriert. Während der Agglomeration wird also die Korngrößenverteilung der Rinde durch die Art und die Stärke der Haftkräfte aus der Aschenwolke selektiert.

Im Gelände sind akkretionäre Lapilli in proximalen Ignimbriten und Surge-Ablagerungen am Top einzelner Fließeinheiten oder in deren Elutriationsasche verbreitet. In distalen Ablagerungen $< 4 - 5 \text{ cm}$ Mächtigkeit treten akkretionäre Lapilli ungeregelt auf. Die Verbreitung des Rinden-Typs ist auf den schlotnahen Bereich der Ausbreitung hochturbulenter Aschenwolken beschränkt. In größerer Entfernung gehen Rinden-Typ Lapilli durch Verlust ihrer Rinde in Kern-Typ Lapilli über. In Surges scheint ihre Ausbildung als Kern- oder Rinden-Typ auch vom Gehalt feinkörniger Asche abhängig zu sein: Feinaschereiche Lagen führen den Rinden-Typ, feinaschearme Lagen den Kern-Typ. Neben akkretionären Lapilli, die direkt im Bodentransport gebildet wurden, treten auch solche aus deren Elutriationswolken auf: Im Surge-Horizont I des Weiberner Tuffs (Rieden-Vulkan, Osteifel) bilden sie durchgehende Lagen.

Ein Vergleich der akkretionären Lapilli der Laacher See Tephra mit denjenigen anderer Vulkangebiete zeigt, daß Aufbau, Internstruktur und Granulometrie unabhängig von der Größe der Aggregate und der chemischen Zusammensetzung der Aschenpartikel gleich sind: Die Bildung akkretionärer Lapilli wird ausschließlich von physikalischen Parametern wie



Kornverteilung in der Aschenwolke, der Strömungsgeschwindigkeit und der Haftkraftverteilung während der Agglomeration bestimmt.

Eine Abschätzung der Haftkräfte zwischen den einzelnen Aschenpartikeln hat ergeben, daß nur Kapillarkräfte kondensierter Fluidbrücken dem Aggregat bis zur Verfestigung den nötigen Zusammenhalt geben. Fluidbrücken liefern starke Haftkräfte, sind aber distanzabhängig - schon bei wenigen um Partikelabstand reißen die Brücken ab. Elektrostatische Kräfte, die bis ca. 0.5 mm Abstand wirken, sind wichtig für die Aggregatbildung, da sie die Stoßwahrscheinlichkeit zwischen Partikeln erhöhen. Allerdings gleichen sich elektrostatische Kräfte im Laufe der Zeit über die Kontaktstellen aus, so daß längerfristige Haftung ebenfalls nur durch Fluidbrücken gewährleistet ist.

In turbulenten Aschenwolken wie vertikalen Eruptionssäulen, horizontalen pyroklastischen Surges und Strömen werden akkretionäre Lapilli ähnlich wie künstliche Aggregate in den technischen Verfahren der Fluidbett- und der Rollgranulation gebildet. Zur Agglomeration kommt es, wenn Aschenpartikel, die durch kondensierten Wasserdampf befeuchtet sind, durch Stoßkontakt aufeinandertreffen. Die Haftkräfte zwischen den Partikeln müssen dabei größer sein als die trennenden Kräfte. Daher bilden die größten Partikel > 0.5 mm in Eruptionssäulen und Surges zunächst nur Agglomerationskeime, an die feinkörnigere Partikel angelagert werden. Erst bei fortschreitender Kondensation - gleichbedeutend mit einer Steigerung der Haftkräfte durch Volumenzunahme der Fluidbrücken - werden grobe Partikel auch in der Randzone der Aggregatkerne agglomert. In fluidisierten pyroklastischen Strömen kommt es im Übergangsbereich des hochkonzentrierten, lawinenähnlichen Stromteiles in die Elutriationswolke zu einer Überlagerung der Aggregatbildungsprozesse der Fluidbett- und der Rollgranulation: Der Strom elutrierender Gase hält die Aggregate eine gewisse Zeit in der Schwebe, während gleichzeitig durch die laterale Ausbreitung des Stromes eine Roll- oder Rotationsbewegung verursacht wird. Dabei entstehen charakteristisch (rotations)elliptische Aggregate.

In windverdrifteten Aschenwolken, sowohl Elutriationswolken aus Bodentransportsystemen wie auch in windverdrifteten Eruptionswolken bilden sich akkretionäre Lapilli durch maßgebliche Beteiligung elektrostatischer Anziehung geladener Aschenpartikel. Durch Reibungselektrizität zwischen Partikeln wird in der Aschenwolke ein elektrostatisches Feld aufgebaut. Anziehungskräfte erhöhen die Zahl der sonst nur zufälligen Stoßkontakte zwischen Partikeln, so daß sich bevorzugt Aggregate bilden. Hier scheinen die ungeordneten Aggregate der ash cluster ein Vorstadium geordneter akkretionärer Lapilli zu sein. Da die Aggregatkerne selbst aus geladenen Partikeln bestehen, können sie in der Aschenwolke feinkörnige Partikel als Rinde anlagern.

In Laborexperimenten wurde elektrostatische Anlagerung vulkanischer Aschenpartikel an einer Metallplatte untersucht. Die Versuche haben gezeigt, daß sich bei Eintritt der Asche in ein elektrostatisches Feld spontan Aggregate bilden. Neben feinkörnigen Einzelpartikeln $< 45 \mu\text{m}$ lagern sich bevorzugt ash cluster mit geringer Sinkgeschwindigkeit an der Platte an, während

grobe Einzelkörner ($> 90 \mu\text{m}$) schnell zu Boden fallen. Allerdings können Partikel bis $180 \mu\text{m}$ Korngröße angelagert werden, wenn sie zuvor in clustern agglomeriert wurden, deren Sinkgeschwindigkeit deutlich geringer ist. Die Kornverteilung des künstlichen Aschensedimentes zeigt Charakteristika, die mit natürlichen Falloutablagerungen explosiver Eruptionen identisch sind.

Aus den experimentellen Daten wurde folgendes Modell der Aggregatsedimentation aus windverdriften Aschenwolken erarbeitet:

In einer Aschenwolke bilden sich durch elektrostatische Kräfte ash cluster. Durch ihre verringerte Sinkgeschwindigkeit werden sie während der Windverdriftung von groben Partikeln mit hoher Fallgeschwindigkeit getrennt (Windsichtung). Innerhalb des agglomerierten Kornspektrums erfolgt keine weitere Korngrößenfraktionierung. Die proximale Asche mit sehr grober Kornverteilung und einem langen, feinkörnigen Schwanz sedimentiert in der Form der Einzelkörner. Das sind grobe Partikel mit anhaftender feinkörniger Asche, die mit partikelspezifischer Fallgeschwindigkeit sedimentieren. Die charakteristische bimodale Kornverteilung medialer Faziesbereiche ca. $50 - < 200 \text{ km}$ läßt sich durch Überlagerung der Sedimentation von Einzelkörnern und ash clustern erklären (zusammengesetztes Sediment). Distal werden Aggregate mit langer Verweilzeit in der Atmosphäre sedimentiert; die Ablagerung hat wieder unimodale Kornverteilung. Anhand dieser Merkmale der Korngrößenverteilung kann Aggregatsedimentation in allen vulkanischen Fallout-Ablagerungen erkannt werden, wenn nicht spätere Prozesse, z.B. Umlagerung, das primäre Kornverteilungsmuster überprägt haben.

Abstract

Accretionary lapilli from the Plinian and phreatomagmatic Laacher See Tephra have been studied in the field and with respect to internal structures and grain-size characteristics. Results were compared with ash aggregates from other volcanoes and deposits.

Accretionary lapilli are concentric ash aggregates which consist (a) either of a coarse-grained core surrounded by a fine-grained rim (rim-type) or (b) consist only of a core (core-type). A sharp break in grain-size distribution and a change in particle texture defines the boundary between core and rim of accretionary lapilli from flows and surges: a densely packed core with predominantly face : face contacts of ash particles changes into a loosely packed rim. This indicates that accreting processes differ between core and rim. The mean density of this type of accretionary lapilli is about 1600 kg/m^3 . Aggregates from ash clouds transported by wind differ in internal structures from those of pyroclastic flows and surges. They are generally loosely packed with abundant edge : face particle contacts and a mean density of 1200 kg/m^3 .

Field relationships show the accretionary lapilli to be concentrated near the top of a single flow unit or surge layer in proximal areas around Laacher See volcano. In distant outcrops accretionary lapilli are irregularly distributed within thin ash layers < 5 cm thick. The sorting of accretionary lapilli is poor in pyroclastic flows. It gradually improves with increasing distance from source because maximum size of aggregates diminishes faster than the mean size. In pyroclastic surges the sorting is generally better even in the proximal area. Additionally, there is a pronounced relationship between the type of accretionary lapilli, distance from source, and thickness of the deposit: in the Laacher See area, accretionary lapilli beds $\pm 20 \text{ cm}$ thick contain the rim-type within about 5 km from the source. At greater distances accretionary lapilli lose their fine-grained rims changing into core-type lapilli. Exceptionally thin bedded ash layers of about 5 cm as well as vesiculated tuff layers contain dominantly core-type lapilli even within short distances from the eruptive center.

Compared with the Laacher See Tephra, accretionary lapilli from other volcanoes are closely similar in internal structures as well as in grain-size distribution characteristics, irrespective of their size their chemical composition. That means formation of accretionary lapilli is controlled by physical factors only: grain-size distribution, flow regime and distribution of binding forces - capillary and/or electrostatic.

Grain-size distribution of the accreted ash depends on the transport capacity and the flow regime of the transporting system. Thus, accretionary lapilli from surges are coarsest with particle sizes > 2 mm. Those large grains are concentrated in the center of the cores forming accretion nuclei. Ash accreted around (not the rim) is significantly finer in proximal areas. about 0.35 mm in grain-size but it becomes coarser grained with increasing distance so that proximal surge-type lapilli are finer grained than distal ones. Accretionary lapilli from pyroclastic flows commonly agglomerate ash only slightly coarser than 0.35 mm irrespective of distance from source, i.e. about 10 - 12 km off the Laacher See. Those of elutriated ash clouds are finest

grained < 0.25 mm. Within the fine-grained rims grain-size distribution is $< 125 \mu\text{m}$ throughout all types of lapilli either from surges or ash clouds. In other words, only ash particles < 0.125 mm can be accreted during rim formation indicating changing granulation mechanisms and/or a change in particle binding forces. The fining outward grading of the rim indicates decreasing efficiency of binding forces.

Evaluation of the binding forces between cohesionless particles shows that only capillary forces of condensed fluid films are strong enough to preserve the aggregates from destruction (impact disintegration or reworking) until solidification. Capillary forces are strong but rather sensitive to particle spacings, whereas electrostatic attraction of charged particles decreases in time by charge transfer, but is still active beyond the distance where fluidal bridges are effective. Hence, electrostatic attraction increases particle agglomeration in ash clouds by increasing collision efficiency when capillary forces link particles once collision occurred.

Accretionary lapilli form in pyroclastic surges and flows similarly to technical procedures of fluidized bed and drum/pan granulation. Binding forces of condensed fluid films must be greater than dispersive forces. Therefore, in surges representing polydispersed, fast-moving clouds, particles ≥ 0.5 mm initially act as granulation nuclei accreting particles < 0.35 mm. At greater distances from source more water vapor has condensed increasing the volume of fluid films. Agglomeration of larger particles is possible because capillary forces became stronger with the increasing volume of fluid bridges. Therefore, proximal accretionary lapilli are finer grained than distal ones. Tephra is dispersed by turbulence not supported by fluidization as it is in pyroclastic flows. Accretionary lapilli under the same physical conditions as other particles: 4 mm sized lithic grains are hydraulically equivalent to 4.5 mm sized accretionary lapilli which is up to 75 - 85 % of the aggregates of a sample. Therefore, accretionary lapilli are better sorted in surge deposits than in ignimbrites - maximum size is limited in surges because the residence time for accretion is also limited.

In fluidized pyroclastic flows, accretionary lapilli form within the transition zone of the lower avalanche and the upper elutriation cloud - i.e. within the segregation zone or -layer. Grain-size distribution is already pre-selected by the capacity of the upward escaping fluidizing gas. That accounts for a number of features: (a) there is no difference in grain-size distribution between proximal and distal aggregates. (b) There is no hydraulic equivalence to large grains of the matrix because they are transported within the avalanche part underneath. (c) Fluidization also supports the aggregates that they can grow larger than in surges. The horizontal velocity of the lower part of the elutriation/segregation cloud is high enough that accretionary lapilli are rotated so that typically roller-shaped aggregates are generated.

Charge separation due to particle friction and grain breakage generates both charged particles and electrostatic fields in the ash cloud. Within the proximal zone of high turbulence fine-grained particles are attracted by the net charge of aggregates forming fine-grained rims around accretionary lapilli. The loose packed particle texture results from particles adhering to each other by the points of opposite charge. This texture can be preserved if the accretion is fast and

no particle rotation into a face : face texture occurs. Farther downflow increased condensation initiates clotting of fines that further selection of fines is impossible. In distal areas only core-type lapilli occur in surge deposits as well as in ignimbrites.

Accretionary lapilli in airfall ashes generate in two different ways:

(a) Within the eruption plume which is a highly turbulent polydispersed cloud rising at a rate of tens of meters per second accretionary lapilli form comparable to surges - large grains are accretion nuclei gathering finer grained ash. This preferentially occurs during phreatoplinian/-magmatic eruptions. Plinian eruptions seem to produce only ash clusters depending on the mass concentration of ash and the amount of condensed vapor.

(b) In highly concentrated elutriation/deflation clouds ash clusters are the precursory stage of fall-type accretionary lapilli. Ash clusters generate during the high concentration stage while the particle spacings of fines are within the range of the grain-size of the coarse fraction. Electrostatics play a major role and initiate cluster formation. Turbulence causes further contacts of clusters and some grains resulting in a loosely packed accretionary lapillus. This is for two reasons: (a) Particles adhere to each other by the points of opposite charge. (b) In the stage of low fluid condensation with only minor fluid films particles can adhere to each other in the position they meet each other and no rotation occurs.

This accretion process also operates in elutriation clouds above pyroclastic flows and surges resulting in a second fall-type accretionary lapillus next to the flow/surge-type.

To study the electrostatic behavior of volcanic ash, laboratory experiments were performed using a powder-coating device. Volcanic ash particles entering an electrostatic field form ash clusters instantaneously. Two types of clusters can be distinguished: (a) single grains - coarse-grained particles ≤ 0.177 mm with some adhering fines - form a fall deposit of coarse unimodal size distribution with a fine-grained tail of the distribution curve; settling velocity is particle-specific. (b) ash clusters predominantly composed of particles $< 45 \mu\text{m}$, but particles up to 0.177 mm in size can be incorporated. The settling velocity is aggregate-specific and lower than that of equidimensional particles because of larger friction in air. Thus, ash clusters are drifted to greater distances from the source than coarser particles and some even adhere to a metal plate positioned at 60 cm distance during the experiments.

To study the grain-size difference between cluster-forming particles and passively incorporated particles, 1ϕ and $1/2 \phi$ splits were used: particles $< 90 \mu\text{m}$ travel the 60 cm distance to the plate but only particles $< 45 \mu\text{m}$ adhere due to particle weight/attractive forces ratio.

From these experiments a model of deposition from drifting ash clouds (either co-ignimbrite or eruption cloud) was developed. Single grains form proximal fall deposits strongly fines-depleted except for the fine-grained tail of the distribution curve. Due to eruption column height and wind velocity, deposits are distributed up to about 50 km from the volcano. Typically bimodal ash results from deposition of ash clusters and single grains at the same site within 50 up to about 200 km from the eruptive center. These ash deposits are composite; the distribution minimum at $45 \mu\text{m}$ resulting from enrichment/depletion processes defines the boundary between

cluster forming particles and single grains accreting only minor amounts of fines. Farther away from the volcano, only ash clusters with low settling velocities are deposited, forming unimodal fine-grained deposits $< 0.25/0.177$ mm in grain-size. The grain-size range typical of ash clusters is uniform over a wide distribution area because no further grain-size fractionation occurs between the agglomerated size fractions.

Aggregate deposition appears to be the typical mode of deposition from ash clouds of explosive eruptions as indicated by the Laacher See (11000 BP), Soufriere (1979), Mount St. Helens (1980) and Tambora (1815) eruption and probably is much more wide spread.

1. Einführung

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Bei hochexplosiven, plinianischen und phreatomagmatischen Vulkaneruptionen werden große Mengen feinkörniger Asche in die Atmosphäre verfrachtet. Diese feinkörnige Asche wird entweder in der Nähe des Eruptionszentrums als Teil der Suspension pyroklastischer Ströme abgelagert oder in höheren Schichten der Atmosphäre von starken Luftströmungen über viele 100e bis 1000e km lateral verdriftet.

Während des Transportes und der Ablagerung der Asche können Aschenaggregate gebildet werden. Die augenfälligste Form sind akkretionäre Lapilli, geordnete, konzentrisch-zonar aufgebaute Aggregate mit meist einem grobkörnigeren Aschenkern und einer feinkörnigeren, äußeren Rinde. Sie sind im proximalen Bereich der Ablagerung pyroklastischer Ströme und Surges häufig, kommen aber auch in Falloutasche vor. Akkretionäre Lapilli sind meist in feinkörnige Aschenmatrix von Ignimbriten oder Surges eingebettet, seltener bilden sie gut sortierte Lagen.

Da Aggregate und Matrix nebeneinander angetroffen werden, erscheint es plausibel, daß die Matrix zwischen den akkretionären Lapilli nicht als Einzelkörner, sondern ebenfalls als Aggregat sedimentiert wurde, weil die gleiche Korngröße in reinen Fallout-Lagen erst in mehr als 300 km Entfernung vom Eruptionszentrum auftritt. In distalen Fallout-Aschen ab ca. 100 km dominieren, wie während des Ausbruchs des Mount St. Helens 1980 direkt beobachtet wurde, ash cluster, locker unregelmäßige, schneeflockenähnliche Aschenaggregate. Das distale Mächtigkeitsmaximum in 300 km Entfernung vom Vulkan wird durch Sedimentation derartiger cluster erklärt.

Aschensedimentation als Aggregate ist zwar weit verbreitet; es gibt jedoch noch keine detaillierte, systematische Bearbeitung der unterschiedlichen Aggregattypen und ihre Zuordnung zu bestimmten Eruptions- und Transportmechanismen. Auch die Prozesse der Aggregatbildung sind unklar.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Prozesse, die in vulkaniklastischen Systemen, den vertikalen Eruptionssäulen, horizontalen Massentransportsystemen, deren Elutriationswolken und in windverdrifteten Aschenwolken, zur Aggregatbildung führen, systematisch zu untersuchen und Modellvorstellungen zu ihrer Genese zu erarbeiten. Die Grundlage hierzu bilden die Untersuchungen der plinianischen und phreatomagmatischen Ablagerungen des Laacher See Vulkans als Fallstudie, die durch Vergleiche mit Ablagerungen anderer Vulkane ergänzt werden. Mit Hilfe detaillierter Geländeaufnahme, mittels Korngrößenanalysen der agglomerierten Partikel und der Trägerschicht, sowie anhand von Untersuchungen der Struktur und der Textur der Aggregate soll eine typologische Zuordnung von Aggregaten zu bestimmten Transportsystemen erarbeitet werden. Die Struktur der Aggregate, die Korngröße der agglomerierten Asche sowie die Textur der Partikel in ihrem Inneren kann dabei Auskunft über die Art der Agglomerationskräfte geben.

Die Untersuchungsergebnisse ermöglichen ein Modell der Ablagerung von Aschenaggregaten, ash cluster und akkretionäre Lapilli aus horizontalen Massentransportsystemen (pyroklastischen Strömen und Surges) und windverdrifteten Aschenwolken zu erarbeiten. Ein solches Modell wird am Beispiel eines Aschenfallouts aus Elutritationswolken erläutert und mit der Sedimentation aus der Eruptionswolke der Mount St. Helens Eruption vom 18. Mai 1980 verglichen. Darüberhinaus wird mit Hilfe weiterer Literaturdaten ein Modell der Ablagerung feinkörniger Asche aus passiv windverdrifteten Aschenwolken entwickelt.

1.2 Stand der Forschung

Aggregatsedimentation vulkanischer Asche, insbesondere in Form akkretionärer Lapilli, ist von zahlreichen historischen und prähistorischen Vulkaneruptionen bis ins Archaische beschrieben worden (Reimer, 1983a; Heinrichs, 1984). Akkretionäre Lapilli sind auch aus den nicht-vulkanogenen, Impakt - erzeugten Ablagerungen des Nördlinger Ries-Suevites bekannt (Graup, 1981).

Akkretionäre Lapilli werden in der älteren Literatur des 19. und der 1. Hälfte des 20. Jahrhunderts überwiegend als Pisolithe bezeichnet. Dieser Begriff stammt aus der Karbonatpetrographie und beschreibt schalig aufgebaute Sphäroide. In neueren Veröffentlichungen wird er nur noch selten synonym verwendet.

Akkretionäre Lapilli sind überwiegend in einzelnen Aschenschichten konzentriert verbreitet, so daß diese Schichten als Leithorizonte stratigraphische Korrelationen auch über größere Entfernungen von 10er - 100 km ermöglichen. Schmincke (1964) parallelisierte mit ihrer Hilfe in der Ellensburg-Formation (Washington) Aschenfallablagerungen in Profilen, die bis zu 70 km voneinander entfernt liegen. Die Distanz zum nächst möglichen Eruptionszentrum in der Kaskadenkette beträgt mindestens 100 km.

Die Entfernungen vom Eruptionszentrum, bis zu denen akkretionäre Lapilli auftreten können, hängen von der Stärke der Eruption und der Art des Transportes der Asche ab. Self (1983) beschreibt aus Neuseeland eine Verbreitung bis zu 140 km vom Vulkan (Wairakei-Formation). Während der Soufriere Eruption 1979 auf der Karibikinsel St. Vincent wurden akkretionäre Lapilli in Aschenfällen bis in 36 km Entfernung nachgewiesen (Brazier et al., 1982). Man findet sie aber auch in allernächster Nähe zum Eruptionszentrum; z.B. in phreatomagmatischen Aschenschichten am Kraterinnenrand der Fossa di Vulcano (Äolische Inseln) oder in der Caldera von Santorin (Heiken & McCoy, 1984).

Akkretionäre Lapilli als primär oft sphärische Gebilde sind in tektonisch-gefügekundlichen Arbeiten als Indikatoren fließender Deformation verwendet worden (Williams, 1922; Ramsay, 1967). Das Achsenverhältnis sekundärer Plättung liefert das Maß der Deformation zur Bestimmung der Dehnungsrate. Tektonische Beanspruchung muß aber nicht die alleinige

Ursache ihrer Deformation sein. Neben simpler Kompaktion der Asche erzielt Verschweißung der Aschenpartikel, z.B. durch Wiederaufheizung im Kontakt mit jüngeren Lavaströmen den gleichen Effekt (Schmincke, 1964 und 1967).

Über die Entstehung und Verbreitung von akkretionären Lapilli in der jeweiligen Aschenschicht sind verschiedene Theorien entwickelt worden:

Regentropfen, die auf feinkörnige Aschenschichten fallen, verkitten die Körner (Scrope, 1829), um anschließend während der (äolischen) Umlagerung nach dem Schneeballprinzip weitere Partikel anzulagern (Lacroix, 1904). Hovey (1902) forderte aufgrund ihres Anklebens an Hauswänden - Eruption der Montagne Pelée, Martinique 1902 - eine Bildung noch in der Aschenwolke, wofür Perret (1913) kondensierenden Wasserdampf verantwortlich machte.

Trocken aus einer Aschenwolke gefallene Aschenkügelchen sind Beobachtungen Stearns (1925) zufolge später rollend am Boden weitergewachsen. Zwei Typen akkretionärer Lapilli unterscheidet erstmalig Macdonald (1949) in Ablagerungen des Kilauea:

(a) Ausschließlich aus Asche aufgebaute Aggregate entstanden durch Regenauswaschung aus der Aschenwolke; (b) ein zweiter Typ entstand um einen feuchten Fremdpartikel während der Umlagerung rollend am Boden (schrägschichtete Aschenlagen!).

Die bislang einzig systematischere Beschreibung lieferten Moore & Peck (1962). Die Autoren verstehen unter dem Begriff akkretionärer Lapillus ein Aschenaggregat, das meist aus einem unstrukturierten Kern aus gröberen Aschenteilchen besteht, der von einer Rinde aus feineren Partikeln umgeben ist. Sie diskutieren folgendes Entstehungsmodell:

Durch kondensierenden Wasserdampf klumpt in den oberen Teilen einer Eruptionssäule die Asche relativ schnell zu intern strukturlosen Aggregatkernen zusammen. Diese Kerne fallen zu Boden und lagern dabei die Rinde an. Die Korngrößengradierung innerhalb der Rinde kommt dadurch zustande, daß bei steigender Temperatur und geringerem kondensierten Feuchtigkeitsgehalt in der Eruptionswolke die Kerne sukzessiv immer feinere Partikel anlagern.

Bisher sind für die Aggregatbildung stets adhäsive Haftkräfte eines Feuchtigkeitsfilmes um einzelne Aschenpartikel verantwortlich gemacht worden. Reimer (1983b) setzt sich mit dem Problem der Haftkräfte aus verfahrenstechnischer Sicht auseinander. Er diskutiert für die Anlagerung von Partikeln kapillare Haftkräfte und elektrostatische Anziehung; für die bleibende Haftung und Haltbarkeit der Aggregate denkt er an van der Waals'sche Kräfte und Materialbrücken. In seinem Entstehungsmodell, bei dem technische Wirbelschichtgranulation zugrunde gelegt wurde, stammen die akkretionären Lapilli ebenfalls aus der Eruptionssäule: Durch die Wirkung elektrostatischer und kapillarer Kräfte bilden sich Kerne in einer turbulenten Eruptionssäule. Eine Rinde lagert sich nach seinen Vorstellungen nur in einer zweiten Aschenwolke an, durch die der Kern in niedrigerer Höhe hindurchfällt. Existiert diese zweite Aschenwolke nicht, fehlt den akkretionären Lapilli auch die Rinde.

Akkretionäre Lapilli galten lange Zeit als Falloutbildung. Auch die Aggregate in den base-surge Ablagerungen der Taal - Eruption, Philippinen 1965, wurden als Fallout in die horizontalen Sargewolken interpretiert (Moore et al., 1966).

Nach neueren Vorstellungen können die Aggregate auch während des Horizontaltransportes selbst entstehen (Fisher & Waters, 1971). Heiken (1971) und Lorenz (1974) beschreiben akkretionäre Lapilli aus phreatomagmatischen Ablagerungen von Maaren. Lorenz bemerkt eine häufige Assoziation mit Blasentuffen, woraus er eine Aggregatbildung im turbulenten Horizontaltransport nasser Sargewolken ableitet. Ab Anfang der 70er Jahre verstärkt sich die Vorstellung, akkretionäre Lapilli seien besonders charakteristisch für phreatomagmatische Ablagerungen, sei es Fallout oder Bodentransport (Schmincke et al., 1973; Schmincke, 1977).

Die Möglichkeit der Entstehung von akkretionären Lapilli in horizontalen Massentransportsystemen diskutieren Hoblitt et al. (1981). Die Aggregate der accretionary lapilli unit des directed blast der Mount St. Helens Eruption am 18. Mai 1980 sind in der noch horizontal bewegten blast-Elutriationswolke entstanden, denn sie wurden auch im Innern von Fahrzeugwracks gefunden (Hoblitt et al., 1981; Hoblitt, schriftl. Mitt.). Sisson (1982) fand in dieser Ablagerung zwei Typen akkretionärer Lapilli: (a) Lapillus ohne feinkörnige Rinde mit blasigem Innern; (b) Lapillus mit Rinde und locker porösem Kern, den er durch elektrostatische Kräfte entstanden interpretiert. Er schlägt eine genetische Klassifikation entsprechend dem Eruptionsstil eines Vulkans vor und bezeichnet Lapillus a als den phreatomagmatischen Typ und Lapillus b als den magmatischen Typ.

Die Bedeutung von Aschenaggregaten als Sedimentationskörper betonen Brazier et al. (1982), Sorem (1982), Rose & Hoffman (1982) und Carey & Sigurdsson (1982). Während der Eruption des Soufrière Vulkans, St. Vincent 1979, wurden mäßig - schlecht sortierte Aschenschichten abgelagert. Einen wesentlichen Beitrag zur Ablagerung der feinkörnigen Asche leisteten akkretionärer Lapilli, von denen sehr viele bei Aufprall auf den Boden zerbrachen. Während der Eruption des Mount St. Helens fielen im schlotnahen Bereich akkretionäre Lapilli vermutlich aus Elutriationswolken pyroklastischer Ströme zusammen mit grobkörniger Asche aus der primären Eruptionswolke (Waitt & Dzuring, 1981; Sigurdsson, Carey, schriftl. Mitt.). Distal ging der Aschenfall in Sedimentation feinkörniger ash cluster über (Sorem, 1982), die in 320 km Entfernung ein zweites Mächtigkeitsmaximum des Aschenfalls erzeugten (Carey & Sigurdsson, 1982).

Der Vollständigkeit halber seien noch subaquatische Vorkommen akkretionärer Lapilli erwähnt: So in der archaischen Onverwacht/Fig Tree Formation Südafrikas (Reimer, 1983a; Heinrichs, 1984); in der ebenfalls präkambrischen Haimaraka Formation Britisch Guajanias (Bateson, 1965), im Lenneporphyr und im sogenannten Hauptvulkanit des Unterdevons im Rheinischen Schiefergebirge (Mügge, 1893; Nelke & Pätzold, 1981; Heyckendorf, 1985). In allen Fällen handelt es sich um Aggregate mit feinkörniger Rinde, die, darin sind sich die Verfasser mit Ausnahme Mügges einig, erst später, nach subaerischer Bildung, ins aquatische Milieu ab- oder umgelagert wurden. Man fand sie auch in fluviatil umgelagerten Tephersedimenten wechselnd mit subaerischen Basaltlavaströmen tertiären Alters in der sogenannten Dipping Reflector Sequence des Voring Plateaus ca. 200 km vor der Küste Nord-Norwegens (Viereck et al. 1988). Fiske (1963) beschreibt subaquatisch abgelagerte akkretionäre Lapilli aus der alttertiären

Ohanapecosh Formation Washingtons. Nach seinen Vorstellungen stammen die Aggregate aus einer subaquatischen Eruption, deren Eruptionssäule aber über Wasser reichte, so daß sich die akkretionären Lapilli subaerisch bilden konnten. Unmittelbar darauf wurden sie wieder ins Wasser abgelagert; - das Hauptproblem ist in dem Falle die Konservierung der Aggregate nach dem Eintauchen ins Wasser (Reimer, 1983b).

2. Arbeitsmethoden

Die Zielsetzung dieser Arbeit ist neben der Erarbeitung von Genese- und Sedimentationsmodellen auch eine typologische Zuordnung akkretionärer Lapilli zu bestimmten Transport- und Ablagerungsmechanismen. Dazu habe ich folgende Untersuchungen durchgeführt:

2.1 Geländearbeiten

Bei der Geländeaufnahme ging es in erster Linie darum, die Verbreitung der Aggregate in einer einzelnen Schicht zu untersuchen und die Veränderungen mit zunehmender Entfernung vom Eruptionszentrum zu erfassen. Dabei standen folgende Fragen im Vordergrund: Kommen akkretionäre Lapilli häufiger an der Basis, am Top, oder unregelmäßig über eine Schicht verteilt vor?

Detaillierte Feinprofile als Schichtausschnitte der aggregatführenden Ablagerungen wurden genau aufgenommen. Proben für die Laboruntersuchungen wurden an ausgewählten Lokalitäten entnommen. Aus lockerer Asche stammen (a) Gesamtproben = akkretionäre Lapilli zusammen mit der Trägerasche, wenn reichlich Aggregate vorhanden waren; (b) Einzelproben = Aggregate und Matrix getrennt: Bei geringer Lapilliführung wurden die Aggregate durch vorsichtiges Zerbröseln der Asche herausgelöst, oder zur Ergänzung von Gesamtproben von Hand gesammelt.

Aus verfestigten Aschenlagen wurden Proben für Dünnschliffe entnommen.

2.2 Laborarbeiten

2.2.1 Probenaufbereitung

Lockere bis schwach verfestigte Asche wurde mit 15-20%igem H_2O_2 (heiß) für eine Siebanalyse aufbereitet. Bei diesem Verfahren zerfällt i.d.R. nur die Matrix, akkretionäre Lapilli bleiben meist erhalten. Die feinkörnige Rinde kann allerdings abplatzen, weil der Korngrößenprung am Übergang Kern - Rinde eine Schwächezone bildet.

Alles Feinmaterial einer Probe wurde auf 1 oder 2 mm Sieben abgesiebt, die akkretionären Lapilli mit der Pinzette vom Sieb gelesen und getrocknet. Verbliebene Bröckchen der Matrix wurden vorsichtig mit dem Finger zerdrückt. Eine anschließende Feinaufbereitung erfolgte durch kurze Ultraschallbehandlung. Behandlungszeiten länger als 1 Minute wurden vermieden, denn die Gefahr des Abriebs und Zerbrechens von vulkanischen Glaspartikeln steigt mit der Behandlungszeit.

2.2.2 Siebanalyse

Matrix

Die Proben wurden naß gesiebt, um (a) das Trocknen nach der Aufbereitung zu umgehen, denn der hohe Anteil der Fraktion $< 63 \mu m$ würde die Probe verkleben. (b) Rütteln der Siebmaschine produziert während der Trockensiebung Abrieb an Bims- und Glaspartikeln, wodurch das Ergebnis verfälscht wird.

Die Matrix wurde im Korngrößenbereich $> 63 \mu m$ in 1 Phi - Intervallen auf Stahlsieben in ihre Einzelfraktionen getrennt. Bereiche extremer Verteilungsminima wurden in 1/2 Phi - Intervallen zur exakteren Lokalisierung des Minimums nachgesiebt.

Die Fraktionen $< 63 \mu m$ wurden mit Hilfe eines Ultraschall - Siebgerätes der Fa. Retsch getrennt, da bei Material mit großem Dichtespektrum, wie es vulkanische Asche darstellt, die Schlämmanalyse im Atterberg-Sedimentationszylinder die Partikel über ihre Sinkgeschwindigkeit nicht nur nach ihrer Korngröße trennt.

Für die Analysen wurden Siebe mit den Lochungen 50, 45, 40, 30, 20, 15, 10 und $5 \mu m$ verwendet.

Arbeitsweise des Gerätes

Der vom Generator erzeugte Ultraschall wird durch das Wasser der Badflüssigkeit auf die Flüssigkeit im Siebturm übertragen. Es bilden sich dabei kleine Bläschen, die sofort wieder implodieren. Diese Mikrokavitation hält die Partikel in Bewegung und die Sieböffnungen frei. Der stete Flüssigkeitsstrom durch den Siebturm nach unten verhindert ein Zurückspringen bereits gesiebter Partikel.

Das Gerät ist für Aufgabemengen bis 2 g ausgelegt. Nach Angaben des Herstellers arbeitet es abriebfrei. Vergleichsanalysen der Bergbauforschung (Essen) mit Quarz- und Kohlestaub nach der Pipett-Methode ergeben gute Übereinstimmung (Emmerichs & Ios, 1977).

Analyse

Die Fraktion < 63 µm wurde in einer Abdampfschale angetrocknet. Mit einem Röhrchen wurden jeweils 3 Teilmengen ausgestochen und nach der Dispergierung ultraschallgesiebt. Um die Antrocknungszeit abzukürzen, habe ich das Wasser soweit als möglich dekantiert. Die Kippung der Schale und das Abrutschen des Probenkuchens beeinflusst die Kornverteilung in der Schale - da das Gerät nur für kleine Probenmengen ausgelegt ist, wurde deshalb die Kornverteilung der Matrix jeweils aus 3 Einzelsiebungen bestimmt, um ein repräsentatives Ergebnis zu erhalten (vgl. 2.3.1 Siebvergleiche).

Akkretionäre Lapilli

Die Aufbereitung der akkretionären Lapilli zur Siebanalyse der agglomerierten Asche erfolgte analog zur Behandlung der Matrix. Infolge der größeren Aggregatfestigkeit wurden die akkretionären Lapilli vor der H_2O_2 -Behandlung vorsichtig zerdrückt. Die Trennung in einzelne Kornfraktionen erfolgte grundsätzlich in 1/2 Phi - Intervallen.

Bei Rinden-Typ Lapilli wurde die Siebanalyse nach Kern und Rinde getrennt durchgeführt. Eine Messerspitze auf der Grenze Kern - Rinde angesetzt läßt die Rinde meist schon bei leichtem Druck abplatzen.

Eine Aufteilung der Feinfraktion zur Ultraschallsiebung ist nicht notwendig, da ich mit kleinen Probenmengen von kaum mehr als 3 1/2 g Gesamtprobe gearbeitet habe.

2.2.3 Schweretrennungen

Tephra (vulkanische Asche) besteht aus Partikeln unterschiedlicher Dichte - Kristalle, Fremdgestein und Glas/Mikrobimse umfassen ein Dichtespektrum von < 1 - > 2.8. Um den Anteil der Komponenten höherer Dichte bestimmen zu können, habe ich an ausgewählten Proben akkretionärer Lapilli und zugehöriger Matrix Schweretrennungen ausgeführt. Als Schwerkraftlösung diente eine wässrige Lösung von Natriumpolywolframat. Diese Substanz bildet als anorganisches Salz in Wasser eine echte Lösung, ihre Dichte ist daher von der Salzkonzentration abhängig. Sie läßt sich im Bereich von 1.1 bis 3.1 stufenlos einstellen. Die von mir verwendete Lösung hat eine Dichte um 2.5. Damit lassen sich Xenolithe und Fremdgestein (Dichte > 2.6) von Glaspartikeln (< 2.5) abtrennen. Zur Trennung wurde ein Sindowski - Scheidetrichter verwendet.

Die Trennungsgänge habe ich nach Korngrößen in 1 Phi-Klassen getrennt ausgeführt, um (a) den Anteil schwerer Komponenten in den Einzelfractionen bestimmen zu können, und (b) die Verteilungsrelationen gegenüber der Matrix besser erfassen und mögliche Selektionstrends aufzeigen zu können.

Von der Matrix habe ich nur die für die Bildung der akkretionären Lapilli relevanten Fraktionen analysiert: Die Phi-Klassen 0.5 - 0.25, -0.125, -0.063 - 0.03 mm Korngröße. Das Material der Aggregate ist in den Fraktionen > 125 µm (Flows) bzw. > 0.25 mm (Surges) aus Gründen der geringen Probenmenge zusammengegeben worden.

Die Phi-Fractionen < 30 µm Korngröße ließen sich nicht trennen, weil nach einiger Zeit ein Flockungsprozeß einsetzte. Derartige Flocken können das Ergebnis verfälschen, weil schwere Partikel am Absinken gehindert bzw. leichte Körner mitgerissen werden können.

2.2.4 Untersuchungen zum Aufbau der Aggregate

Von den getrockneten akkretionären Lapilli wurde anhaftende Matrix durch vorsichtiges Putzen entfernt. Anschließend wurde mit einer Schieblehre der größte und kleinste Durchmesser, bei dreiachsigen Ellipsoiden auch die 3. Raumachse, auf 1/10 mm genau gemessen. Daraus wurde das Achsenverhältnis D_s/D_l (shortest : longest diameter D) errechnet.

Das Querschnittsgefüge wurde am aufgebrochenen Lapillus untersucht. Die Teilungsebene ist die D_s - D_l Ebene, um die Achsenlängen bei Rinden-Typen auch am Kern messen zu können. Bei der Auflichtuntersuchung wurde ein Fadenzähler mit 1/10 mm - Teilung benutzt. Gemessen wurden:

- Die Achsen des Kerns; ersatzweise die Dicke der Rinde;
- Dicke von äußerer und innerer Rindenzone;
- Blasengröße, große - mittlere - kleine Blasen.

Das Gefüge wurde qualitativ nach folgenden Kriterien beschrieben:

- sichtbarer, konzentrischer Aufbau im Kern,
- Packungsdichte der Partikel
- Blasen
- Aufbau der Rinde - Gradierung, multiple, oder diskontinuierliche Rindenschalen etc.

Weitere Gefügeuntersuchungen wurden in Dünnschliffen und unter dem Rasterelektronenmikroskop durchgeführt. Die REM-Untersuchungen mittels Sekundärelektronenbilder dienten vor allem der Untersuchung der Partikeltextur im Aggregat.

2.3 Vergleichende Analysen

2.3.1 Vergleichssiebungen

Bei vergleichenden Siebanalysen stehen u.a. folgende Fragen im Mittelpunkt: Wie repräsentativ ist die Korngrößenanalyse einer Einzelprobe einer Lokalität? Wie genau ist eine Einzelanalyse, besonders im Hinblick auf das Verfahren der Siebung kleiner Teilmengen mit Ultraschall?

Gesamtproben

Zur Beantwortung der 1. Frage wurden drei Proben der gleichen Schicht eines Probenpunktes analysiert. Zur Verdeutlichung sind zwei Beispiele herausgegriffen (Tab. 2-1): Eine Siebanalyse gibt die Kornverteilung eines Ignimbrites mit einer durchschnittlichen Genauigkeit von ± 2 Gew.% gegenüber weiteren Einzelanalysen wieder.

Tabelle 2-1: Vergleich von Korngrößenanalysen der gleichen Probe Aschenmatrix.

Table 2-1: Grain-size distribution of several samples from the same location.

Sample Size (mm)	Loc. 7b				Loc. 1			
	A	B	C	Mean	A	B	C	Mean
		Weight - %				Weight - %		
> 2.0	---	1.13	1.03	0.72	2.00	0.95	3.60	2.18
1.0	1.31	2.17	1.69	1.72	5.86	2.06	3.99	3.30
0.5	2.01	3.34	2.26	2.54	7.37	4.11	6.73	6.07
0.25	3.28	3.68	3.75	3.57	11.11	9.32	9.48	9.97
0.125	9.88	8.21	6.67	8.25	15.16	15.03	14.02	14.74
0.063	15.03	15.71	14.03	14.92	11.47	15.60	15.42	14.16
0.030	21.46	19.71	22.58	21.25	11.55	11.62	10.13	11.10
0.015	18.54	16.10	20.31	18.32	11.15	13.14	11.88	12.06
0.005	18.21	16.48	19.34	18.01	16.08	18.69	16.72	17.16
< 0.005	10.25	13.48	9.32	11.02	10.25	9.45	8.04	9.24

Tabelle 2-2: Vergleich von Korngrößenanalysen nach der Ultraschall-Siebmethode.

Table 2-2: Grain-size distribution of several analyses of the same sample using ultra-sonic sieving.

Sample	Mechanical mixture of different samples							
Size (mm)	1	2	3	4	5	6	Mean	Mean(1+2+4)
	Weight - %							
> 0.045	5.02	5.32	4.54	4.50	5.44	5.07	4.98	4.95
0.030	6.69	7.32	7.06	6.94	7.14	7.11	7.04	6.98
0.020	6.10	5.49	5.34	4.83	5.30	5.51	5.43	5.47
0.015	3.52	3.58	3.25	3.09	3.14	3.17	3.29	3.40
0.010	6.52	6.29	6.27	5.95	6.17	6.82	6.34	6.25
0.005	3.83	3.60	4.26	4.01	4.25	2.83	3.79	3.81
< 0.005	10.81	10.41	11.35	12.69	10.51	11.49	11.21	11.30

Vergleich von Ultraschall-Siebungen

Wie genau ist eine Siebanalyse mit Ultraschall, wenn aus einer Abdampfschale mit 30 - 50 g Probe eine Menge von 2 - 3 g ausgestochen wird?

Ich habe aus einem Gemisch verschiedener Proben je sechs Teilmengen zu Vergleichszwecken gesiebt (eine Richtprobe (1) und 5 Vergleichsproben). Die Richtprobe gäbe die Kornverteilung wieder, wenn es nur diese eine Analyse gäbe (Beispiel in Tabelle 2-2).

Es bestehen zwar deutliche Unterschiede zwischen den Einzelsiebungen, die von der Kornverteilung innerhalb der Schale abhängen (durch das Dekantieren ist die gröbste Verteilung unterhalb des Ausgießers). Es besteht aber kaum noch Abweichung zwischen dem Mittel aller Siebungen und dem Mittel der Richtprobe + gröbste Verteilung + feinste Verteilung. Diese Teilmengen sind in der Schale unterhalb des Ausgießers, der Schalenmitte und gegenüber des Ausgießers ausgestochen.

Nach diesem Schema sind alle Korngrößenbestimmungen der Matrix in jeweils drei Teilmengen gesiebt und gemittelt worden.

Tabelle 2-3: Korngrößenanalysen der gleichen Probe akkretionärer Lapilli.

Table 2-3: Grain-size distribution of several analyses of the same sample accretionary lapilli.

Sample	Loc. 7b			Loc. 94		
	> 5 mm	3-5 mm	< 3 mm	> 4 mm	2-4 mm	< 2 mm
Size (mm)	Weight - %			Weight - %		
> 0.35	0.62	0.75	0.74	0.42	0.43	0.82
0.25	0.90	1.00	0.98	0.38	0.43	0.60
0.18	2.19	2.84	2.46	1.15	1.02	1.15
0.125	4.09	4.71	3.54	2.31	2.33	2.14
0.090	8.91	9.21	7.64	6.79	7.36	7.86
0.063	15.13	14.83	11.73	11.13	9.97	9.11
0.045	11.67	15.64	12.76	9.79	17.08	13.77
0.030	13.2	11.47	9.78	14.95	11.55	12.98
0.020	10.4	10.10	9.43	13.40	10.93	12.41
0.015	6.71	6.23	7.75	6.16	7.65	7.46
0.010	8.26	8.32	8.73	11.05	10.13	10.22
0.005	6.18	4.79	6.54	7.72	6.64	7.10
< 0.005	11.28	10.11	17.91	14.76	14.74	14.37

Siebung der Asche akkretionärer Lapilli

Die Reproduzierbarkeit hängt wesentlich vom Erfolg der Probenaufbereitung ab. Da die akkretionären Lapilli stärker verfestigt sind als die Matrix, ist die H_2O_2 -Behandlung weniger wirkungsvoll. Mit Ultraschall darf aber auch nicht zu lang behandelt werden, um größere Mengen Abrieb zu vermeiden (Zwei Vergleichsanalysen in Tab. 2-3). Die Abweichungen der Einzelproben liegen üblicherweise im Bereich 0.5 - 2 Gew.%. Damit ist die Spannweite der Abweichung etwa so groß wie bei den Daten der Matrixanalysen.

2.3.2 Ultraschallsiebung und Atterberg-Schlämmanalyse

Bei der Schlämmanalyse im Atterberg-Sedimentationszylinder werden die Kornfraktionen entsprechend den unterschiedlichen Fallzeiten der Partikel getrennt. Voraussetzung für ein korrektes Ergebnis ist die einheitliche Dichte aller Partikel. Da vulkanische Asche aus Partikeln mit einem breiten Dichtespektrum von $< 1 - > 2.8$ besteht, sollten die Ergebnisse der Schlämmanalyse drastisch von denen der Ultraschall-Siebanalyse abweichen.

Die Fallzeiten der Partikel können nach dem Stokes'schen Gesetz, das den Reibungswiderstand einer ruhenden Sedimentationsflüssigkeit gegenüber einer sinkenden Kugel beschreibt, berechnet werden (Formeln zur Berechnung im Anhang). Zur Durchführung der Schlämmanalysen wurde die Fallzeit der einzelnen Kornfraktionen für eine einheitliche, mittlere Partikeldichte von 2.6 berechnet. Die Füllhöhe des Zylinders beträgt konstant 25 cm. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2-4 zusammengefaßt:

Tabelle 2-4: Sinkgeschwindigkeiten von Partikeln unterschiedlicher Größe und Dichte in Wasser.

Table 2-4: *Settling velocities of particles in water.*

Density	<u>Settling time</u>			
	2.0	2.4	2.6	2.8
	h:min:sec	h:min:sec	h:min:sec	h:min:sec
Fract. (mm)				
0.030	0:08:30	0:06:03	0:05:29	0:04:42
0.015	0:33:54	0:24:15	0:21:12	0:18:55
0.005	5:05:--	3:38:--	3:15:--	2:49:--
<u>Drop distance</u>				
	ca 16 cm	ca 22.5 cm	25 cm	28 cm
<u>Grain-size (μm)</u>				
Time				
0:05:29	38.0	31.5	30.0	27.8
0:21:12	19.0	16.0	15.0	14.0
3:15:--	6.3	5.3	5.0	4.7

Diskussion

Generell weichen die Daten von Schlamm- und Siebanalyse stark voneinander ab. In Ausnahmefällen ist eine Übereinstimmung der Werte für die Fraktion $< 5 \mu$ m innerhalb der Grenzen der Reproduzierbarkeit (Kap. 2.3.1) erkennbar. Der Bereich $> 30 \mu$ m ist gegenüber der Siebfraktion unterrepräsentiert. Eine derartige Verschiebung der Fraktionsanteile kann durch Abweichung der Partikelform von der Kugel verursacht sein. Die Sinkgeschwindigkeit nichtsphärischer Partikel ist langsamer als die von Kugeln, und zwar um so mehr, je deutlicher die Asphärizität ausfällt (Komar & Reimers, 1978). In solchen Fällen muß die Stokes'sche Gleichung um einen Formfaktor erweitert werden. Das trifft sicherlich für vulkanische Asche zu, doch sollten alle Partikel gleichermaßen betroffen sein, denn die Oberflächenrauigkeit (etwa angebrochene Blasen von Mikrobimsen gegenüber glatten Kristallen) tritt nach Untersuchungen von Baba & Komar (1981) hinter den Formeinfluß zurück.

So ist der Hauptgrund für eine zunächst nicht ganz einsichtige Verschiebung der Fraktionsanteile in der unterschiedlichen Partikeldichte zu suchen. In diesem Fall sollte die größte Fraktion alle schweren Komponenten mit kurzer Fallzeit anreichern. Sie ist aber gegenüber der Siebverteilung unterrepräsentiert. Es läßt sich nachweisen, daß diese Unterrepräsentation vom Verhältnis schwere - zu leichten Komponenten abhängig ist und leicht an Hand der Stokes'schen Gleichung zu erklären ist.

Geht man davon aus, daß (a) im Bereich $< 5 \mu\text{m}$ nur die Feststoffdichte eine Rolle spielt, die Raumdichte blasiger Glasscherben (Mikrobimse) nicht berücksichtigt zu werden braucht, weil solche kaum vorkommen; daß (b) in dieser Fraktion kaum Kristalle auftreten, so kann der Anteil $< 5 \mu\text{m}$ annähernd mit der Siebfraktion übereinstimmend erfaßt werden. Die Unterschiede der Fallgeschwindigkeit von Partikeln der Dichte 2.6 gegenüber 2.5 (etwa Phonolithglas) sind so gering, daß sie sich nur unwesentlich in der Fallstrecke bzw. dem Äquivalentdurchmesser auswirken: Zusammen mit Partikeln 5 μm der Dichte 2.6 sedimentieren Partikel 5.1 μm der Dichte 2.5.

Mit steigendem Korndurchmesser verändert sich die Situation erheblich, zumal nun Mikrobimse mit geringerer Raumdichte zu berücksichtigen sind. Als Beispiel habe ich eine Dichte von 2.4 und von 2.0 berechnet.

Fallzeit, Fallstrecke und Äquivalentdurchmesser sind für Partikel der Dichte $D = 2.0$; 2.4 und 2.8 für konstante Temperatur $T = 20^\circ\text{C}$ berechnet (Tabelle 2-4).

Tabelle 2-5: Vergleich der Korngrößenanalyse nach der Schläm- und der Ultraschall-Siebmethode.

Table 2-5: Grain-size distribution of the same sample analyzed by means of settling velocity method and ultra-sonic sieving.

Tabelle 2-5a: Ash matrix

Sample Mixture of different samples

Size (mm)	Settling velocity method (SVM)				Mean	Sieving
	1	2	3	4		
	Weight - %					
> 0.030	9.17	10.94	9.50	8.84	9.61	21.91
0.015	27.07	26.67	26.84	22.55	25.78	19.35
0.005	31.19	33.05	33.13	34.61	33.00	32.35
< 0.005	23.62	20.39	20.99	22.03	21.76	12.05

Tabelle 2-5b: Accretionary lapilli

Sample	A		B	
	Sieve:	SVM: Weight - %	Sieve:	SVM:
Size (mm)				
> 0.35	---		1.30	
0.25	1.01		1.15	
0.18	1.56		5.78	
0.125	5.76		7.18	
0.090	7.50		9.07	
0.063	9.98		11.04	
0.030	28.95	17.53	24.59	20.19
0.015	18.72	29.03	16.52	24.59
0.005	15.72	20.52	13.98	14.89
< 0.005	10.79	11.65	9.85	7.37

Daraus ergibt sich folgendes:

Wird die Suspension im Zylinder zur Bestimmung des Anteils 15 - 30 μm nach 5 1/2 Min. abgelassen, sind alle Partikel < 30 μm mit $D = 2.6$ in Schwebelage - aber auch alle mit einer geringeren Dichte als 2.6 ($D = 2.4$ bis 31.5 μm ; $D = 2.0$ noch bis 38 μm). Um diesen Differenzbetrag wird die Fraktion 15 - 30 μm zu hoch bewertet. Zugleich sind alle schwereren Komponenten bereits sedimentiert, bei $D = 2.8$ bis 28 μm Größe. Um diesen Anteil wird die Fraktion zu gering berechnet.

An der Siebfraction 30 - 63 μm der Probe LLST (Lok 78) ist mittels Schwereretrennung der Anteil der Fraktion mit $D > 2.5$ bestimmt worden, er beträgt 1.2 Gew.% der Gesamtprobe oder 20 Gew.% der Einzelfraktion. Bei einer derartigen Verteilung leichter - und dichter Komponenten ist sofort einsichtig, daß ein größerer Anteil leichter Partikel mit $d > d_{\text{Soll}}$ (d = Partikeldurchmesser) in Suspension verbleibt. Er wird dort in der kleineren Fraktion mitgewogen, die somit überbewertet wird. Der Anteil schwerer Partikel mit $d < d_{\text{Soll}}$, der zuviel absinkt, hat demnach nur geringen Einfluß. So sammelt der Bodensatz zwar die Komponenten hoher Dichte, doch die Fraktion wird in der Schlämmanalyse bei einer Dichteverteilung von $< 2.5 : > 2.5 = 5 : 1$ gegenüber der Siebfraction unterbewertet.

Eine Korrektur in Richtung verlängerter Fallzeit (entspricht geringerer Dichte) schafft nur auf den ersten Blick Abhilfe. Der Anteil dichter Komponenten in der jeweils gröberen Fraktion wäre noch stärker überbewertet, und das Ergebnis möglicher Schwereretrennungen wäre noch stärker verfälscht, als es an Schlämffractionen ohnehin schon ist.

Diese Überlegungen haben dazu geführt, die Korngrößenbestimmungen nach der Siebmethode mit Ultraschall vorzunehmen, obwohl ein systematischer Fehler durch Abrieb bruchempfindlicher Scherben bei zu langer Beschallung erzeugt werden kann.

Der Fehler der Schlämmanalyse ist zwar systematisch, aber von der (zunächst unbekannten) Komponentenverteilung abhängig und läßt sich daher kaum korrigieren.

3. Vulkanologische Grundlagen

3.1 Eruptions- und Sedimentationsmechanismen

Bei hochexplosiven, plinianischen Vulkaneruptionen, benannt nach Plinius dem Jüngeren, der die Eruption des Vesuv im Jahre 79 beschrieb, werden große Mengen Asche und Bims in (10er)km hohen Eruptionssäulen in die Atmosphäre verfrachtet (Abb. 3-1). Die vertikale Eruptionssäule besteht aus einer unteren Gasschubzone, in der das Material im Strom expandierender, vulkanischer Gase beschleunigt wird (magmatische Förderung). Durch Einsaugen umgebender Luft in den Freistrahler der Gasschubzone und stete Sedimentation wird die Gesamtdichte dieses unteren Säulenteils verringert, der in die obere Konvektionszone übergeht, wenn eine geringere Dichte als die umgebende Atmosphäre erreicht ist.

Die Ablagerungen, die während hochexplosiver Eruptionen entstehen, sind regional durch Winddrift fächerförmig verbreitete Fallablagerungen. Proximal bis einige 10er km Entfernung vom Eruptionszentrum verbreitete Bimsdecken gehen distal in über 100e -100000e km² verbreitete Aschenfallablagerungen über. Aggregatsedimentation in Form von ash clustern und akkretionären Lapilli hat entscheidende Bedeutung für die Bildung derartiger Aschenfallablagerungen (Carey & Sigurdsson, 1982; Sorem, 1982; Brazier et al., 1982). Ash cluster verdriften grob- und feinkörnige Aschenpartikel gemeinsam, oft über 100e km. Akkretionäre Lapilli sind auf den proximalen bis medialen Faziesbereich beschränkt und treten besonders häufig bei phreatomagmatischen Eruptionen auf. Es entstehen mäßig bis schlecht sortierte Aschenfallablagerungen, weil die Aggregatbildung Korngrößenfraktionierungen während des Transportes verhindert. Mächtigkeit und Korngröße nehmen in Fallablagerungen mit zunehmender Distanz zum Vulkan ab. Distale Mächtigkeitsmaxima können wie das Maximum der Mount St. Helens Eruption durch Aggregatsedimentation erklärt werden (Rose & Hoffman; Sorem; Carey & Sigurdsson, 1982). Aggregatsedimentation steigert die Sedimentationsrate gegenüber Einzelkornsedimentation in einem bestimmten Entfernungsbereich vom Vulkan.

Der Übergang von der Gasschubzone einer Eruptionssäule in die Konvektionszone ist eine kritische Grenze. Ist der Gasschubteil mangels ausreichender Expansion überfrachtet, kollabiert er gravitativ (Wilson, 1976; Sparks et al., 1978). Die kollabierte Masse bildet am Boden einen pyroklastischen Strom (engl. flow) als horizontales Massentransportsystem. Inkorporierte Luft und entmischte, vulkanische Gase fluidisieren die Tephra teilweise und machen sie fließfähig. Ausbreitungsgeschwindigkeiten pyroklastischer Ströme reichen von einigen 10er bis über 100 m/sec (Sheridan, 1979; Wilson & Walker, 1982; Walker & Wilson, 1985; Wilson, 1985).

Die dichte Bodensuspension wird in den Tälern kanalisiert und folgt dort dem Talweg (Talfazies der Ablagerungen), während sich auf den angrenzenden Höhen und in ebener Landschaft als Overbank-Fazies nur eine verdünnte Suspension ausbreitet (Fisher, 1979; Fisher & Heiken, 1982). Fluidisierendes Gas entweicht nach oben aus dem Strom und elutriert dabei feinkörnige Asche, die eine konvektierende Elutriationswolke über dem pyroklastischen Strom bildet (Koginimbit Aschenwolken). Solche Wolken können bis zu mehreren km hoch in die Atmosphäre

aufsteigen und werden dabei ebenfalls vom Wind lateral verdriftet (Fisher & Schmincke, 1984). Aus den Wolken sedimentieren als Aschenfallablagerung unabhängig vom pyroklastischen Strom verbreitete Elutriations- oder Ko-Ignimbrit Ascheschichten (Sparks & Walker, 1977).

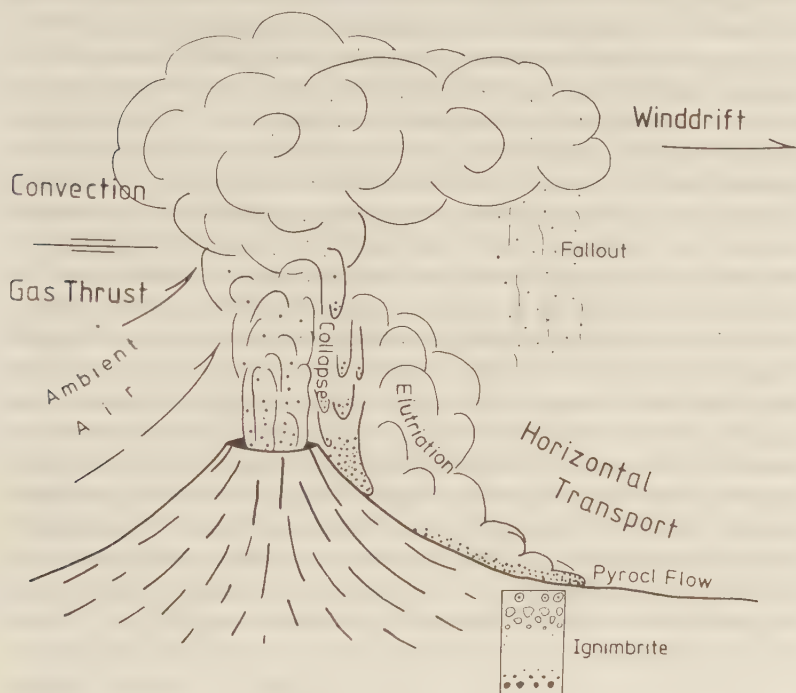


Abb. 3-1: Transport- und Ablagerungsmechanismen während plinianischer Eruptionen. Die Tephra wird durch expandierender Gase und Konvektion in die Atmosphäre transportiert und durch Winddrift verbreitet. Bei Überfrachtung kollabiert die Eruptionssäule und bildet einen pyroklastischen Strom als lawinenähnliches Massentransportsystem. Die Ablagerung heißt Ignimbrit.

Fig. 3-1: Transport and deposition mechanisms during Plinian eruptions. Erupted tephra is jetted into the atmosphere by expanding volcanic gas (gas thrust). Incorporation and heating of ambient air, as well as steady fallout, diminishes the density of the eruption column so that it can rise convectively. Tephra is laterally distributed by wind. Overloading results in gravitational collapse of the column forming pyroclastic flows, - partly fluidized density currents. The flow deposits show a typical basal concentration of lithic fragments and a concentration of buoyant pumice lapilli near the top.

Die Ignimbrit genannten Ablagerungen pyroklastischer Ströme sind schlecht sortierte, oft massig erscheinende Tephra-Ablagerungen, deren charakteristisches Interngefüge durch Saigerung der lithischen Klasten und Flotation der Bimse während des Fließens entsteht. Die Zonierung ermöglicht eine Unterteilung in einzelne Fließeinheiten. Bei hohen Wassergalten 15-20 % kann en masse abgelagerte Tephra als Blasentuff ausgebildet sein (Lorenz, 1974). Ihr Charakteristikum sind bis zu mehrere mm große Blasen, in denen sich Gas gesammelt hat - akkretionäre Lapilli sind häufig. Blasentuffe sind typisch für Ablagerungen phreatomagmatischer Eruptionen - explosive Ausbrüche, deren Dynamik entscheidend von der außergewöhnlich heftigen Wasser - Magma Wechselwirkung beeinflusst wird, die eine enorme Steigerung der Explosivität bewirkt. Ein Großteil der thermischen Energie wird zur Aufheizung des Wassers umgesetzt, so daß Konvektion der Eruptionssäule weniger bedeutend ist als in magmatischen Eruptionen. Das im Schlotkanal komprimierte Gemisch aus Tephra, vulkanischem Gas und Wasserdampf expandiert auch horizontal über dem Kraterrand. Es entstehen Surges als befurchte Druckwellen, die sich mit hoher Geschwindigkeit vom Schlot ausbreiten (Fisher & Waters, 1971). So sind schlotnah verbreitete Ablagerungen horizontaler Massentransportsysteme häufiger als großflächige Aschenfallablagerungen aus konvektierenden Eruptionssäulen. Die geringe Feststoffkonzentration der Surges - Suspension ermöglicht meistens eine scharfe Komponententrennung während des Transportes nach ihrer Größe und Dichte. Die Ablagerungen sind durch die höhere Ausbreitungsgeschwindigkeit und die geringere Feststoffkonzentration im Transportsystem weniger reliefabhängig als Ignimbrite (Sigurdsson et al., 1987). Sie sind mäßig - schlecht sortiert; proximal häufig mit Antidünen schräggeschichtet, die distal in ebene Parallelschichtung übergehen (Wohletz & Sheridan, 1979; Valentine, 1987). Feinkörnige, windverdriftete Ko-Surge Aschenwolken können ähnlich wie Wolken aus pyroklastischen Strömen Aschenfallablagerungen im proximalen Bereich bilden.

3.2 TephraKomponenten

Die Auswurfprodukte explosiver Vulkaneruptionen werden in ihrer Gesamtheit in unverfestigtem Zustand unabhängig von der Größe und der Zusammensetzung der Partikel Tephra genannt. Der Begriff vulkanische Asche wird als Korngrößenbegriff für alle Partikel < 2 mm Korngröße verwendet. Verfestigte Asche wird Tuff genannt.

Aschen bestehen aus drei verschiedenen Komponenten, die je nach Magmenchemie, Eruptions- und Ablagerungsmechanismen in wechselnden Anteilen vorhanden sind. Komponenten der eruptierten Schmelze sind Glaspartikel und Kristalle; sie werden daher essentielle Komponenten genannt, um sie von den magmafremden, xenolithischen Komponenten zu unterscheiden. Das sind Bruchstücke sedimentärer, metamorpher oder auch älterer magmatischer Gesteine der Schlotwände. Entsprechend unterschiedlich ist ihre Partikelform.

- Glaspartikel amorph erstarrter Schmelze bilden je nach Gasgehalt der Schmelze und Eruptionsmechanismus entweder blasenreiche Partikel (Mikrobimse), oder U-, Y- und T-förmige Scherben ehemaliger Stege zwischen den Blasen (Blasenwandscherben). Während phreatomagmatischer Eruptionen unterbindet die Abschreckung des Magmas im Wasserkontakt weitere Gasentmischung aus dem Magma, so daß blasenarme, blockige Glasscherben entstehen, in denen die Blasen keinen Einfluß auf die Scherbenform haben.
- Kristalle sind vor der Eruption in der Schmelze gebildet worden. In Tephra-Ablagerungen haftet den Kristallkörnern häufig noch ein Glassaum ehemaliger Schmelze an.
- Nebengesteinsbruchstücke werden bei der Eruption von den Schlot- und Magma kammerwänden losgesprengt. Die Partikelform ist von der Gesteinsart abhängig: Paralleltexturierte Schiefer bilden plättchenförmige Fragmente, während aus massigen Gesteinen blockige Partikel entstehen.

Durch Agglomeration von Tephrapartikeln können konzentrische Aggregate, sogenannte akkretionäre Lapilli entstehen. Sie entstehen entweder um einen groben, mm-großen Partikel (Bims, Kristallkorn oder Gesteinsbruchstück), der als Agglomerationskeim feinkörnigere Asche anlagert, oder die Aggregate sind vollständig aus Asche < 0.5 mm Korngröße zusammengesetzt. Die Partikelform der angelagerten Asche hat dabei insofern einen gewissen Einfluß auf das Interngefüge, als Scherbenform und Korngrößenverteilung je nach Vergrößerung des betrachteten Ausschnitts ein mehr oder weniger poröses Partikelgefüge bilden, in dem die Scherbenform eine dichtere Packung verhindert. So hat das als dichtes Gefüge mit flächenförmigen Partikelkontakten beschriebene Gefüge immer noch eine Porosität von 30 - 40 %. Daneben gibt es ein lockeres Gefüge, in dem punktförmige Partikelkontakten überwiegen, die Porosität beträgt ca. 40 - 50 %. Diese Unterschiede in der Packungsdichte und der Partikeltextur beruhen aber weniger auf der Partikelform, sondern hauptsächlich auf Agglomerationsprozessen. Makroskopische Unterschiede im Aggregataufbau führen zu folgender Klassifizierung akkretionärer Lapilli.

3.3 Klassifizierung akkretionärer Lapilli

Eine Klassifizierung akkretionärer Lapilli ist nach verschiedenen Kriterien möglich: (a) Anhand des Aufbaus, (b) der Zugehörigkeit zu verschiedenen Ablagerungstypen, Fall, Flow, oder Surge, oder (c) auf genetischer Basis. Sisson (1982) legte die Art der Vulkaneruption, magmatisch oder phreatomagmatisch, zugrunde und benannte die beiden Aggregattypen entsprechend. Er unterscheidet nach der Form der agglomerierten Glaspartikel den (rindenlosen) phreatomagmatischen Typ und den magmatischen Typ mit feinkörniger Rinde. Diese Unterteilung ist aber nach meinen Untersuchungen nicht haltbar, weil akkretionäre Lapilli ohne feinkörnige Rinde auch in Ignimbriten magmatischer Eruptionen vorkommen, bzw. die Aggregate in distalen Ablagerungen die Rinde verlieren.

Diese Unterteilung ist aber nach meinen Untersuchungen nicht haltbar, weil akkretionäre Lapilli ohne feinkörnige Rinde auch in Ignimbriten magmatischer Eruptionen vorkommen, bzw. die Aggregate in distalen Ablagerungen die Rinde verlieren.

Reimer (1983b) unterscheidet drei Typen: a mit, b ohne feinkörnige Rinde; Typ c ist genetisch benannt: Als Schneeball am Boden rollend weitergewachsen. Gefügemerkmale für den Typ c werden nicht genannt.

Die vorliegende Untersuchung hat gezeigt, daß für eine beschreibende Klassifizierung die Existenz einer feinkörnigen Rinde das wichtigste Unterscheidungsmerkmal ist.

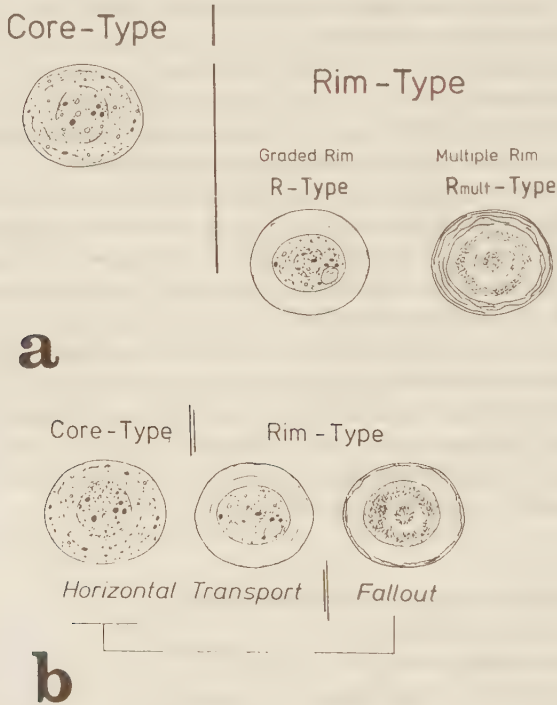


Abb. 3-2: Klassifikation akkretionärer Lapilli: (a) Zwei Typen akkretionärer Lapilli werden unterschieden: Der Kern-Typ (engl. Kürzel C-Typ) ohne und der Rinden-Typ (engl. Kürzel R-Typ) mit feinkörniger Rinde. (b) Vorkommen der jeweiligen Typen in Aschen aus Fallout und Bodentransport.

Fig. 3-2: Classification of accretionary lapilli: (a) Classification is based on the presence of a fine-grained rim. One can distinguish core-type lapilli without a rim (C-type) and rim-type lapilli with a fine-grained rim (R-type). Fine-grained rims may either be internally graded (outward grain-size decrease) or they consist of several discontinuous fine-grained shells (multiple rims). (b) Accretionary lapilli occur in tephra deposits of various origin: R-type with graded rims and C-type lapilli occur in ignimbrites and surge deposits (horizontal transport). R-type with multiple rims and C-type occur in fallout ashes. For further distinction, designation of the deposit type may be added in brackets: R(flow)-lapillus = rim-type lapillus from a pyroclastic flow deposit.

Akkretionäre Lapilli ohne Rinde sind auf ihren Kern reduziert und werden daher als Kern-Typ (engl. C(Core)-Type) bezeichnet; Aggregate mit Rinde werden als Rinden-Typ (engl. R(Rim)-Type) bezeichnet (Abb. 3-2a). Zur weiteren Unterteilung werden unterschiedliche Rindenausbildungen benutzt: Die Rinde ist gradiert, oder besteht aus Lagen von alternierend gröberen und feinkörnigeren Schalen: Es ergeben sich zwei Untergruppen, von denen jedoch nur diejenige mit alternierendem Schalenbau als Multiple - Rindenlapilli R_{mult} -Typ bezeichnet wird. Eine Sonderform dieses Typs ist der kernlose Lapillus, der praktisch auf seine Rinde reduziert ist.

Da akkretionäre Lapilli in allen pyroklastischen Ablagerungen vorkommen können, kann zur näheren Spezifizierung der Zusatz Fall, Flow, oder Surge angegeben werden - Beispiel: Ein C(Flow)-Lapillus ist ein akkretionärer Lapillus ohne feinkörnige Rinde aus pyroklastischen Strömen. Diese Benennung bietet bereits die Zuordnung zu Transportsystemen und Ablagerungstypen. Die Zuordnung basiert auf dem Interngefüge des Kerns. In zweiter Linie ist dessen Korngrößenverteilung entscheidend. Die Rinde hat nur noch geringe Bedeutung, da sie in distalen Ablagerungen fehlt. Man kann zwei Gruppen unterscheiden: (a) Bodentransport - Aggregate mit einem dichten Partikelgefüge im Kern; (b) Fallout - Aggregate aus windverdrifteten Aschenwolken mit lockerem Gefüge im Kern (Abb. 3-2b).

Anwendung

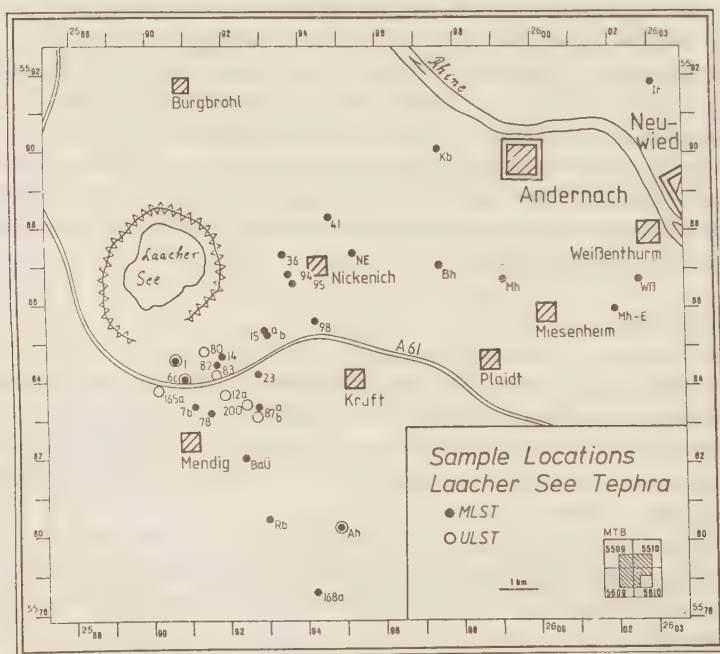
Die Anwendung der hier vorgeschlagenen Klassifikation ist nach der Aufgabenstellung unterschiedlich. Zur Beschreibung von Tephra-Ablagerungen bekannten Ursprunges wird man die beschreibende Klassifikation anwenden. Die Unterscheidung in C- und R-Typ ist sinnvoll und liefert weitere Informationen über die Ablagerung, z.B. relative Entfernung zum Eruptionszentrum und Turbulenzgrad. Zur Unterscheidung verschiedenartiger Ablagerungen wird der Zusatz Fall-, Flow- und Surge angegeben.

Die Beschreibung einer Ablagerung unsicherer Entstehung, etwa in Bohrprofilen oder sehr kleinen Aufschlüssen kann evtl. über die Beschreibung des Interngefüges eine genetische Unterscheidung erleichtern, da so auch maximale Information im Hinblick auf eine Interpretation der Ablagerung der Asche gegeben wird. Genetische Begriffe und die Zusätze Fall-, Flow- und Surge- werden immer dann gebraucht, wenn es in einer Ablagerung oder einer Schicht verschiedene Typen akkretionärer Lapilli zu trennen gilt.

4. Fallstudie: Akkretionäre Lapilli der Laacher See Tephra

4.1. Vorkommen und Verbreitung

Der Laacher See Vulkan eruptierte vor etwa 11000 Jahren ca. 5.3 km^3 (DRE) phonolithisches Magma und hinterließ dabei eine proximal bis über 50 m mächtige Abfolge von Fall-, Fließ- und Surge-Ablagerungen (Bogaard & Schmincke, 1984). Nach der lithologischen und chemischen Zusammensetzung der Ablagerungen wird die Abfolge in die Unteren-, Mittleren- und Oberen Laacher See Tephra (engl. Kürzel: LLST, MLST, ULST) gegliedert (Abb. 4-1). In regionaler Verbreitung der proximalen Fazies kann ein ENE-gerichteter Haupt- von einem SSE-gerichteten Nebenfächer unterschieden werden. Zwischen beiden Ablagerungsfächern bestehen deutliche fazielle Unterschiede: Im östlichen Hauptfächer dominieren gut sortierte, plinianische Fallablagerungen gegenüber Ablagerungen aus Bodentransportsystemen. Der südliche Nebenfächer wird dagegen überwiegend aus horizontal transportierten Fließ- und Surge-Ablagerungen aufgebaut. Feinkörnige, schlecht sortierte Aschenschichten sind meist Ablagerungen pyroklastischer Ströme und Surges, aber auch proximaler Aschenfallout (Schumacher & Schmincke, 1987). Diese Schichten führen oft akkretionäre Lapilli.



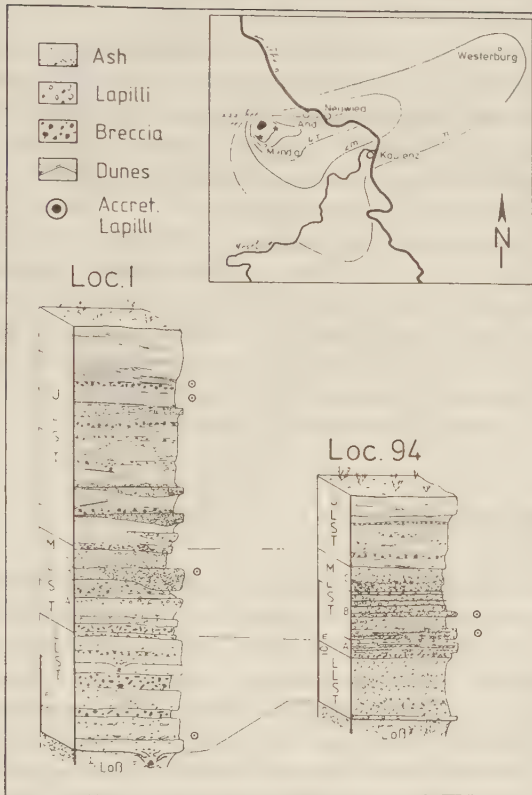


Abb. 4-1: Stratigraphie proximaler Laacher See Tephra (LST) südlich (Lok. 1) und östlich (Lok. 94) des Vulkans (Sternchen der Indexkarte; Abb. 4-2). Aschenschichten, aus denen Proben bearbeitet wurden, sind mit dem Symbol für akkretionäre Lapilli gekennzeichnet. Die Indexkarte zeigt die regionale Verbreitung der proximalen Tephra mit Haupt- und Nebenfächer (nach Bogaard, 1983).

Fig. 4-1: Stratigraphy of proximal Laacher See Tephra (LST) south (Loc. 1 in Fig. 4-2) and east (Loc. 94) of the volcano (stratigraphic units are Lower- (LLST), Middle- (MLST), and Upper (ULST) Laacher See Tephra.) There is a pronounced change in depositional facies between the southern fan, predominantly built up by ash layers from pyroclastic flows and surges in the LLST - MLST, and the NE-fan dominated by Plinian fallout lapilli beds. Ash layers are only a minor component of the MLST. The index map shows the thickness and areal distribution of the proximal tephra facies in the main northeasterly fan and the subordinate southeasterly fan (after Bogaard, 1983). Sampled ash layers are indicated by the symbol of accretionary lapilli in the vertical sections.

4.1.1 Die basale Untere Laacher See Tephra (LLST)

Die Laacher See Eruption begann mit einer initialen, phreatoplinianischen Explosion, die eine lokal bis zu 1.5 m mächtige, schlecht sortierte Aschenschicht mit reichlich Fremdgestein aus tertiären und quartären Deckschichten ablagerete. Diese Schicht enthält C-Typ Lapilli bis zu 10 mm Größe. Die Aggregate sind schlecht strukturiert, viele zeigen im Innern größere Hohlräume, andere sind abgeplattet. Im Gelände sind sie nur schwer erkennbar, da sie nicht lagenförmig angereichert sind; - sie wurden auch nicht näher untersucht.

In der 3.5 km südlich des Laacher Sees gelegenen Lokalität 78 fehlt diese Basisasche. Die Laacher See Tephra setzt über einer Lössschicht mit einer Wechselfolge von dünngeschichteten Bimsapilli- und feinkörnigen Aschenschichten ein. Eine hellgraue Aschenschicht nahe der Basis der LST ist reich an C-Typ Lapilli, die über die gesamte Schicht verteilt sind. Der Anteil beträgt ca 35 Gew.%. Die Größenverteilung der akkretionären Lapilli umfaßt, verglichen mit anderen Proben, ein enges Spektrum von 2.0/4.5 mm (der 1. Wert gibt das Häufigkeitsmaximum einer Probe, der 2. Wert den Mittelwert der drei größten akkretionären Lapilli an).

4.1.2 Die Mittlere Laacher See Tephra (MLST)

Die Mittlere Laacher See Tephra setzt mit phreatoplinianischen Ablagerungen (MLST-A) ein. Im Mendiger Ablagerungsfächer südlich des Laacher Sees dominieren horizontalgeschichtete Lapillischichten aus Bodentransportsystemen, während östlich des Laacher Sees im Nickenicher Faziesbereich plinianische Bimsdecken überwiegen (Bogaard, 1983). Die Wechselfolge von Bims-Fallout und Ignimbritbänken in der MLST-B östlich des Laacher Sees wird im Süden von einer ununterbrochenen Abfolge von Ablagerungen zahlreicher pyroklastischer Ströme vertreten, die in ehemaligen Tälern eine Mächtigkeit bis über 10 m erreichen (Abb 4-2). Seitlich der Täler liegt das kaum mehr als 1 m mächtige Äquivalent der Overbank-Fazies, die zeitgleich aus den pyroklastischen Strömen abgelagert wurde (Schumacher, 1983; Schumacher & Schmincke, in Vorb.). Akkretionäre Lapilli sind, abhängig von der Fazies und der Entfernung zum Eruptionszentrum, in diesen Schichten reichlich vorhanden.

Der Mendiger Ablagerungsfächer

Im Mendiger Ablagerungsfächer werden die MLST-B - Ignimbrite vom Faziesgegensatz der Overbank-Fazies (< 1 m) und der Tal-Fazies (bis > 10 m) geprägt. Die Mächtigkeit der Overbank-Fazies nimmt von ca 100 cm in 1.8 km auf 1.5 - 2 cm in 10 km Entfernung vom Laacher See ab. Am Wingertsberg (Lok. 1) sind noch 11 - 12 Fließeinheiten unterscheidbar (Schumacher, 1983); ab ca. 6 km Transportweite tritt nur noch eine einzige Aschenlage auf (Abb. 4-3).

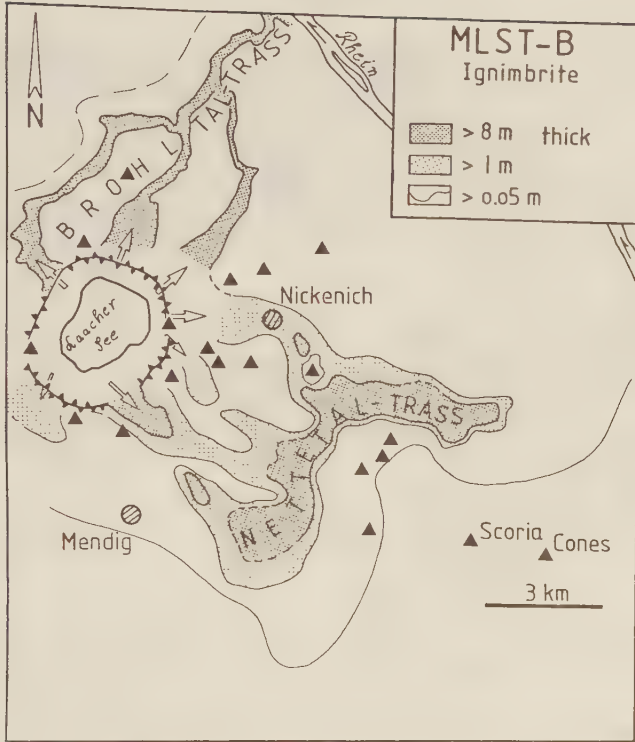


Abb. 4-2: Regionale Mächtigkeitsverteilung des MLST-B - Ignimbrits. Die pyroklastischen Ströme akkumulierten in Paläotälern zwischen älteren Schlackenkegeln und bilden den Nettetäl-Trass im Süden und den Brohltal-Trass im Norden (nach Bogaard, 1983).

Fig. 4-2: Regional thickness distribution of the MLST-B - ignimbrite. Pyroclastic flows accumulated in paleovalleys between older scoria cones forming the > 10 m thick Nettetäl-Trass in the south and the Brohltal-Trass in the north (after Bogaard, 1983).

Akkretionäre Lapilli sind schlotnah nur in den beiden obersten, hellbraunen Aschenschichten verbreitet (Abb. 4-4, -5; Tafel 1). Zwischen beiden Schichten besteht insofern ein markanter Unterschied, als die untere Schicht ausschließlich C-Typ, die obere Schicht nur R-Typ Lapilli führt.

Mit zunehmender Transportweite entwickelt sich in der unteren Aschenschicht ein 1 cm dicker Blasentuff, an dessen Unterseite C-Typ Lapilli häufig mit dem Tuff verklebt sind. Blasentuffe zeichnen sich durch stärkere Verfestigung und Hohlräume zwischen den akkretionären Lapilli aus; Blasen im Schichtinneren sind bis 2 mm groß. Eine Besonderheit in Lokalität 78 sind einzelne akkretionäre Lapilli auch an der Tuffoberseite (Abb. 4-4).

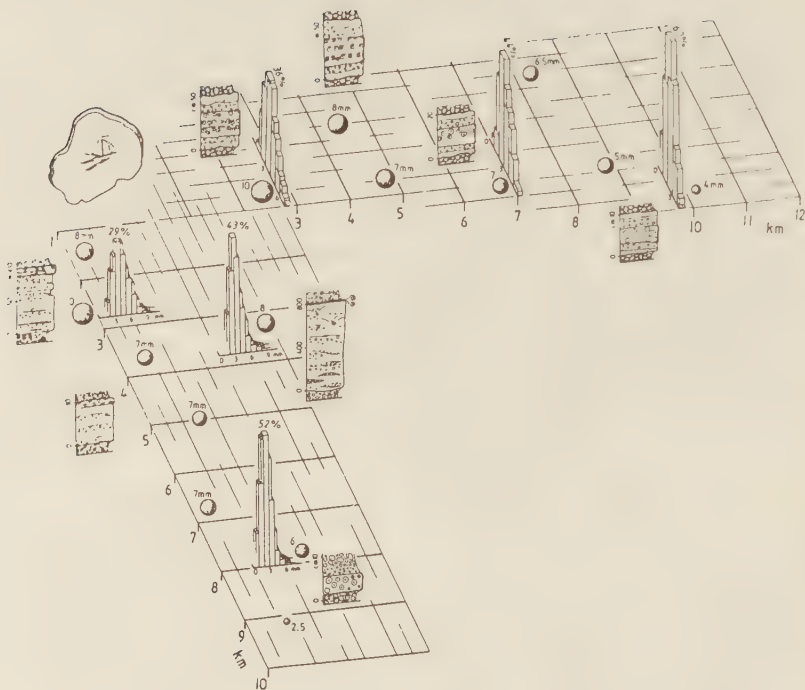


Abb. 4-3: Größenvariation akkretionärer Lapilli mit zunehmender Entfernung vom Laacher See. Die Histogramme zeigen das Größenspektrum einer Probe; die Kugeln symbolisieren das Mittel der 5 größten, gefundenen Aggregate.

Fig. 4-3: Size-variation of accretionary lapilli with increasing distance from Laacher See. Histograms show the variation of individual samples; balls indicate the mean value of the 5 largest aggregates found at a given location.

Weder im Querbruch noch im Dünnschliff sind textuelle Unterschiede zwischen angekitteten Aggregaten und dem Tuff selbst erkennbar. Der gesamte Blasentuff scheint primär aus mehr oder weniger geordneten, durch Kompaktion zusammengeklumpten Aggregaten zu bestehen.

Mit zunehmender Transportweite nimmt in der Overbank-Fazies mit der Gesamtmächtigkeit auch die Zahl der Fließeinheiten ab. Gleichzeitig werden in den verbliebenen Schichten akkretionäre Lapilli häufiger. 6.8 km südlich des Laacher Sees (Lok. Reginarisbrunnen Rb) ist noch eine einzige an akkretionären Lapilli reiche Aschenschicht von 4 cm Dicke vorhanden. Eine stratigraphische Zuordnung zu einer der proximal unterscheidbaren Fließeinheiten ist nicht möglich. Zwei km südöstlich besteht die Aschenlage vollständig aus akkretionären Lapilli. Die

Aggregatgröße hat von 3.5/10 mm in Lok.7b auf 2.5/6.5 mm abgenommen (Abb. 4-4), ihr Anteil an der Ablagerung steigt dabei von ca 20-25 auf mehr als 35 Gew.%.

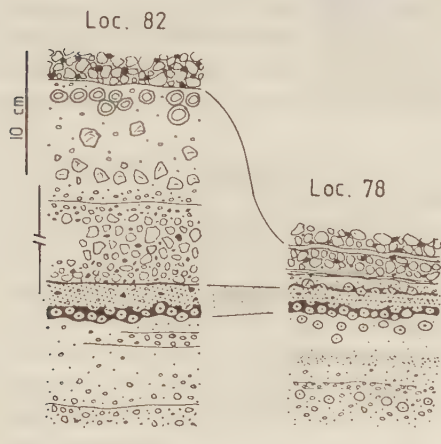


Abb. 4-4: Feinstratigraphie der oberen Aschenlagen des MLST-B - Ignimbrits in Tal-fazies (Lok. 82) und Overbankfazies (Lok. 78). In der Overbankfazies sind die Aggregate sowohl unterhalb wie oberhalb des Blasentuffs (gepunktet) nachzuweisen; Hohlräume zwischen den Aggregaten sind schwarz gezeichnet. Symbole: ⊙ R-Typ; ⊙ C-Typ.

Fig. 4-4: Uppermost ash layers of MLST-B - ignimbrite in valley facies (Loc. 82) and overbank facies (Loc. 78). A 1.5 cm thick vesiculated tuff (dotted) incorporated C-type lapilli; there is little or no ash matrix between the aggregates (voids are shown in black). R-type lapilli are concentrated near the top of the upper ash layer.

In der gesamten Tal-Fazies treten akkretionäre Lapilli wie in der proximalen Overbank-Fazies nur in den hellbraunen Aschenschichten am Top des Ignimbrits auf. In der unteren Teilschicht sind C-Typ Lapilli an den hier 1.5 cm dicken Blasentuff gebunden, der mit Lok. 78 parallelisiert werden kann (Abb. 4-4). Die obere, normalgradierte Aschenschicht setzt mit scharfer Untergrenze über der Bimszwischenlage ein. R-Typ Lapilli sind im Schichtoberteil konzentriert. Im Dünnschliff erkennt man Fragmente zerbrochener akkretionärer Lapilli leicht an den Rindensegmenten (Tafel 2). Die Schicht geht in den nachfolgenden plinianischen Bimsfallout der MLST-C über.

Der Nickenicher Ablagerungsfächer

Der fazielle Gegensatz zwischen Overbank- und Tal-Fazies ist im Nickenicher Fächer weniger stark ausgeprägt, da das Nickenicher Paläotal bereits im Bereich der Ortschaft Nickenich von Osten nach Süden umbiegt (Abb. 4-2). Die Ignimbrite der MLST wurden zwischen Nickenich und dem rechtsrheinischen Neuwied-Gladbach (Lok. NwG) ausschließlich in Overbank-Fazies untersucht. Proximal ist die Abfolge mehr als 2 m mächtig; einzelne Bänke bestehen aus bis zu 5 Aschenschichten. Akkretionäre Lapilli kommen in allen Aschenlagen vor, da die Einzelschichten trotz der Nähe zum Eruptionszentrum ungewöhnlich geringmächtig sind (Abb. 4-5).

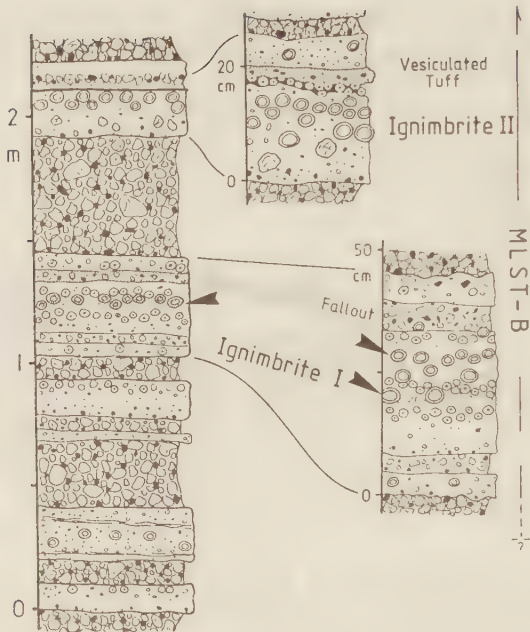


Abb. 4-5: Feinstratigraphie der Wechselfolge aus plinianischen Bimslapillischichten und Ignimbritbänken östlich des Laacher Sees (Lok. 94/95). Der untersuchte Aschenfallout im Oberteil des Ignimbrits I ist durch Raster hervorgehoben.

Fig. 4-5: Alternating Plinian pumice lapilli beds and ignimbrites about 2 km east of Laacher See volcano (loc. 94/95). A very fine-grained dust layer with occasional pumice and lithic lapilli was deposited in the upper part of ignimbrite I (dotted). The associated R-lapilli are concentrated underneath the dust layer. Ignimbrite II shows a pronounced enrichment of R-lapilli in the center. A 2 cm thick vesiculated tuff indicated by the dotted pattern contains characteristic C-lapilli.

Unterer Ignimbrit der MLST-B (Ignimbrit I)

Die Aschenschicht besteht aus einer Wechselfolge von Aschenstrom- und Aschenfallablagerungen, die sich zeitlich mit plinianischem Lapilli-Fallout überlagern (Kap. 6.3.3). In schlotnahen Aufschlüssen (Lok. 94/95, 41 und Nickenich-Eich NE) sind im Mittelteil des Ignimbrits I C-Typ Lapilli in drei Einzellagen angereichert. Die Größenverteilung der akkretionären Lapilli liegt bei 3.0/10 mm. Mit zunehmender Transportweite nimmt nicht nur die Mächtigkeit ab, sondern auch die Zahl der Lagen akkretionärer Lapilli verringert sich von drei auf eine in 7 km Entfernung vom Laacher See (Lok. Bürgerhaus Bh). Die verbliebene Schicht kann noch über weitere 5 km unverändert bis zum Rhein verfolgt werden. Die Aggregatgröße hat nach

10 km Transportweite auf 2.0/4.5 mm in Lok. Weißenthurm (Wß) abgenommen; - akkretionäre Lapilli sind also distal wesentlich besser sortiert (Abb. 4-3). Der Anteil akkretionärer Lapilli in einer Schicht steigt von ca. 20 auf mehr als 35 Gew.%. Rechtsrheinisch fehlen Aufschlüsse in Flußnähe. In der Lokalität Neuwied-Gladbach (NwG), 4.5 km vom Rhein entfernt, ist die Bank I noch 7 cm mächtig. Der Hauptteil besteht aus drei Teilschichten (Fließeinheiten ?), die von Partikellamellen aus gut sortierter Grobasche getrennt werden. Akkretionäre Lapilli aus pyroklastischen Strömen (Flow-Typ) fehlen.

Falloutaschen

Im unteren und oberen Viertel der Ignimbrit I tritt je eine markante, hellbraune Aschenschicht auf. Mit der oberen Schicht sind gleichfarbige R-Typ Lapilli assoziiert, die aber hier 2 - 5 cm unterhalb der Aschenlage angereichert sind. Noch in 10 km Entfernung vom Laacher See (Lok. And) wurden 1 cm große Aggregate gefunden. Mit zunehmender Entfernung nimmt die Anzahl akkretionärer Lapilli stetig ab - damit unterscheidet sie sich von den anderen, bislang beschriebenen Ablagerungen. Ein weiteres besonderes Kennzeichen ist neben der Farbe der Reichtum an Bims- und Xenolithlapilli (Abb. 4-5). Die Schicht wird als Fallout interpretiert und bildet einen hervorragenden Leithorizont östlich des Laacher Sees. Sie wird in Kapitel 6.3 ausführlich diskutiert.

Oberer Ignimbrit der MLST-B (Ignimbrit II)

Die Ablagerung besteht proximal aus vier Einzellagen. Im Mittelteil sind in Lok. 94/95 R-Typ Lapilli angereichert (Abb. 4-5; Tafel I). Der Aggregatkern ist oft stark abgeplattet; Blasen sind häufig. In distalen Ablagerungen verlieren die R-Typ Lapilli ihre feinkörnige Rinde und gehen in den C-Typ über! Unmittelbar darüber folgt ein ca 2 cm dicker Blasentuff, dessen C-Lapilli wiederum teilweise mit dem Tuff verklebt sind. Die Gesamtmächtigkeit nimmt von 35 cm in Lok. 94 auf ca 1 cm in Lok. Wß ab.

4.1.3 Die Obere Laacher See Tephra (ULST)

Die Obere Laacher See Tephra (ULST) wurde in der finalen, phreatomagmatischen Phase der Laacher See Eruption abgelagert. Die Wasser-Magma - Wechselwirkung führte zu heftigen, explosiven Eruptionen, so daß Tephra überwiegend aus horizontalen Bodenwolken, pyroklastischen Strömen und Surges abgelagert wurde. Zu Beginn der ULST-Eruption entstanden mäßig sortierte Lapillibreccien (Abb. 4-6), gegen Ende dominieren in der obersten ULST schlecht sortierte, feinkörnige, dünnen und laminiert geschichtete Aschenlagen. Den Abschluß bilden die sehr feinkörnigen Siltschichten (Schmincke et al., 1973; Bogaard &

Schmincke, 1984; 1985). Die feinkörnigen, aschenreichen Schichten sind reich an akkretionären Lapilli. Die Ablagerungen wurden entlang der Achse des Hauptablagerungsfächers östlich Mendig untersucht.

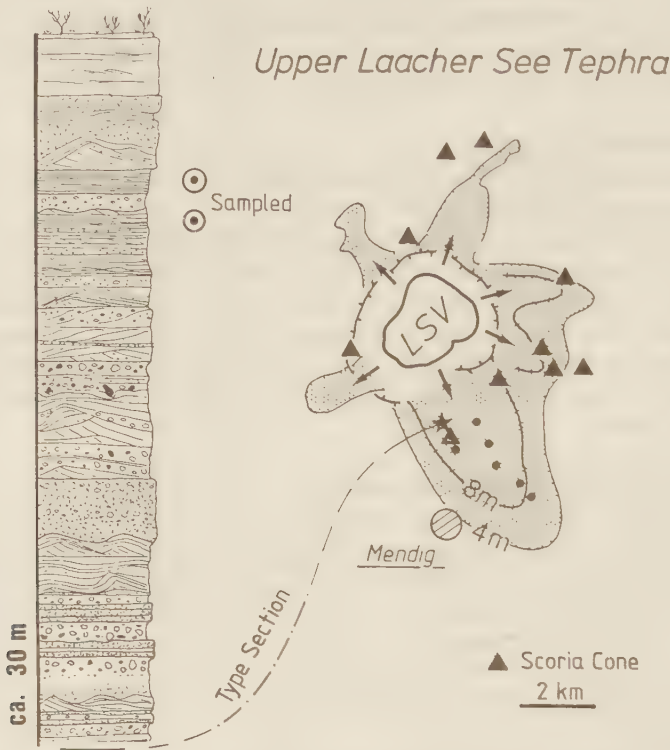


Abb. 4-6: Stratigraphie und Mächtigkeitsverteilung der Oberen Laacher See Tephra (nach Schmincke et al., 1973 und Freundt & Schmincke, 1986). Die beprobten Horizonte sind mit dem Symbol für akkretionäre Lapilli gekennzeichnet; Lokalitäten sind in der Karte mit Sternchen markiert.

Fig. 4-6: Stratigraphy and regional distribution of Upper Laacher See Tephra (after Schmincke et al., 1973; Freundt & Schmincke, 1986). Deposits are thickest in the paleovalley northeast of Mendig, and consist of alternating breccia layers, cross-stratified beds with antidunes, and intercalated ignimbrites. The uppermost deposits are formed by massive fine ash - the silt layers of Schmincke et al. (1973). (Sampled layers are indicated by the symbol for accretionary lapilli; sample locations are shown in the map).

Ablagerungen pyroklastischer Ströme

Nordöstlich der Ortschaft Mendig ist in Lok. 83 ein Ignimbrit in 0.8 - 1.4 m Mächtigkeit aufgeschlossen (Tafel 1). Die Ablagerung besteht, nach interner Bimsanreicherung zu urteilen, vermutlich aus drei Fließeinheiten. Der Hauptteil wird von einer schwach hellbraun gefärbten, 8 cm dicken Segregationslage (Wilson, 1980) überlagert, auf die eine 0.5 - 1 cm dicke Elutriationsasche folgt. Die Elutriationsasche führt ca. 2 mm große C(Flow)- und vereinzelt R(Fall)-Lapilli.

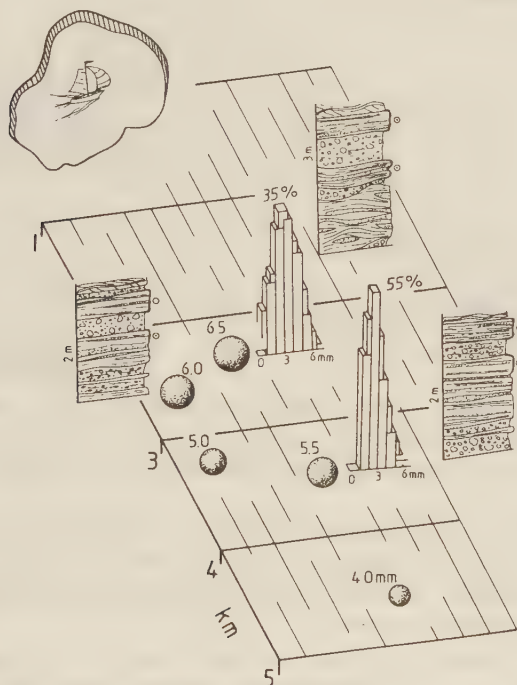


Abb. 4-7: Größenvariation der C-Typ Lapilli in Surges der ULST (Liegendes der Breccienlage B-16; Darstellung wie 4-3).

Fig. 4-7: Size variation of accretionary lapilli from surges of the ULST that are stratigraphically below breccia layer B-16. Aggregate-size variation even of proximal surge deposits is more restricted than the variation found in ignimbrites, i.e. sorting of accretionary lapilli is better in surges (cf. histograms of Fig. 4-3).

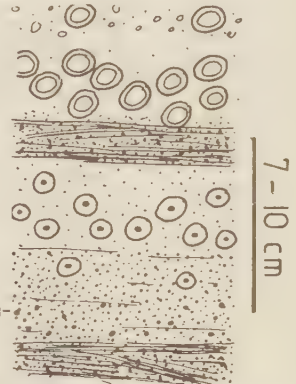
Laminierte Surge-Ablagerungen

Akkretionäre Lapilli wurden in den laminierten, aschenreichen Surge-Lagen im Liegenden und Hangenden der Breccienlage B-16 (Schmincke et al., 1973) untersucht (Abb. 4-6).

Proximal kann bis ca 1.5 km Entfernung vom Eruptionszentrum das gesamte Schichtpaket aus Dünen mit internen Diskordanzen bestehen (Abb. 4-7). Mit zunehmender Distanz zum Vulkan gehen die Dünen in Horizontalschichtung über.

Die interne Abfolge ist typisch für laminierte Surge-Ablagerungen (s. auch Viereck, 1984) und besteht aus einer rhythmischen Abfolge von Explosionseinheiten:

Oberteil Matrixreich; bimodale Korn-
verteilung mit Asche und fein-
körnigen Lapilli;
akcretionäre Lapilli.
Unterteil Matrixarm, grobkörnig, xenolith-
reich (modifiziert mit gut sor-
tierten C-Typ Lapilli)



Akkretionäre Lapilli sind in diesen Ablagerungen sowohl als C-Typ wie auch als R-Typ vertreten; schlotnah überwiegen, die Blasentuffe ausgenommen, R-Typ Lapilli. Makroskopisch unterscheiden sie sich kaum vom R-Typ aus Ignimbriten, jedoch ist ihre Rinde etwas dünner und Blasen im Kern sind seltener.

C-Typ Lapilli sind entweder in gut sortierten Lagen im Unterteil einer Surge-Lage angereichert (Lok. 83), oder sie sind an Blasentuffe gebunden, mit denen sie zusammengeklumpt sein können. Die Größenvariation von 2.5/6.5 mm zeigt, daß sie auch in schlotnahen Ablagerungen besser sortiert sind als in Ignimbriten (Abb. 4-7).

Etwa in der Mitte des unteren Surge-Rhythmus sind bis zu 1 cm große R(Fall)-Lapilli verbreitet. Im Aufbau ähneln sie den R-Typ Lapilli des Aschen-Fallouts der MLST-B - eine Fallout-Asche fehlt jedoch in dieser Sequenz.

Mit zunehmender Transportweite vermehrt sich die Anzahl der Blasentuffhorizonte vermutlich als Folge anhaltender Wasserdampfkondensation von zwei in Lok. 80 auf mindestens sechs in der 2 km südlicher gelegenen Lok. 200. Nach Lorenz (1974) bilden sich Blasentuffe bei (erhöhtem) Wassergehalt von mehr als 20 % im Sediment. Sie gelten neben akkretionären Lapilli als ein wichtiges Merkmal phreatomagmatischer Ablagerungen. Etwa ab 3.5 km, gehen die R-Typ Lapilli wie in den Ignimbriten östlich des Laacher Sees durch Verlust ihrer Rinde in C-Typ Lapilli

über. Allmählich nimmt auch ihre Größe ab, die Sortierung verbessert sich aber nur sehr zögernd, da das Spektrum relativ zu Ignimbroiten bereits besser sortiert ist.

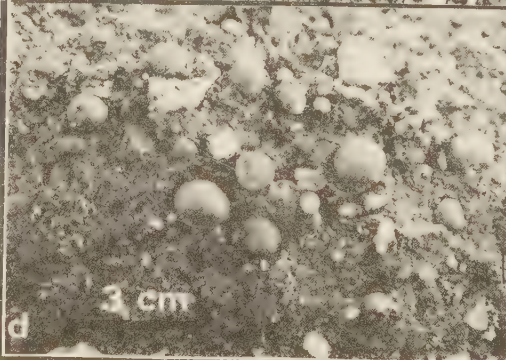
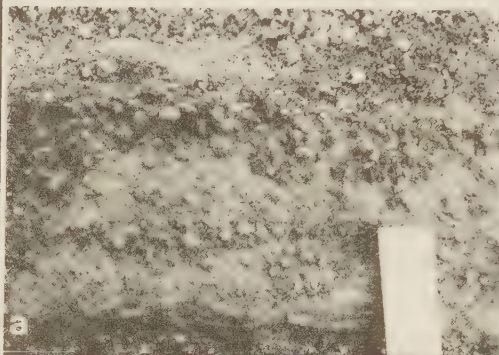
Eine schrägschichtete Surgeablagerung in den Siltschichten führt sowohl C- wie R-Typ Lapilli, aber in verschiedenen Teilschichten. Der jeweilige Aggregattyp ist von der Kornverteilung der Trägerschicht bzw. von deren Gehalt an feinkörniger Asche abhängig - der C-Typ tritt in der unteren, feinaschenarmen Teilschicht, der R-Typ in der feinaschenreicheren Teilschicht darüber auf (Abb. 4-8).



Abb. 4-8: Ein Schrägschichtungshorizont der Siltschichten (oberste ULST) führt C- und R-Typ Lapilli abhängig vom Gehalt feinkörniger Asche: C-Lapilli treten in der feinascheärmeren, R-Lapilli in der feinaschereicheren Lage auf (Lok. 165a).

Fig. 4-8: Cross-stratified surge deposit within the silt layers (uppermost ULST). C- and R-lapilli occur in different layers depending on the amount of fine-grained ash: the C-type occurs in the lower layer, which is poor in fine ash, whereas the R-type occurs in the upper layer, which contains larger amounts of fine ash (Loc. 165a).

Plate 1



Erläuterungen zu Tafel I

Nahaufnahmen akkretionäre Lapilli führender Aschenlagen im Gelände.

(a) C-Lapilli sind an der Ober- und Unterseite eines Blasentuffs angereichert.

(b) Ignimbrit I in Lok. 94 östlich des Laacher Sees. Im oberen Drittel ist die Staubasche an ihrer helleren Färbung erkennbar; R(Fall)-Lapilli sind unterhalb der Schicht angereichert.

(c, d) Gesamtbild und Detail des R(Flow)-Lapilli führenden Ignimbrits II in Lok. 95.

(e) Ignimbrit der ULST. Die Obergrenze des Ignimbrits bildet eine hellbraune, 0,5 - 1 cm dicke Elutriationsaschenschicht mit vorwiegend C(Flow)- und vereinzelt R(Fall)-Lapilli (Lok. 83).

Explanations of Plate I

Close-up photographs illustrating the distribution of accretionary lapilli within discrete ash layers in the field.

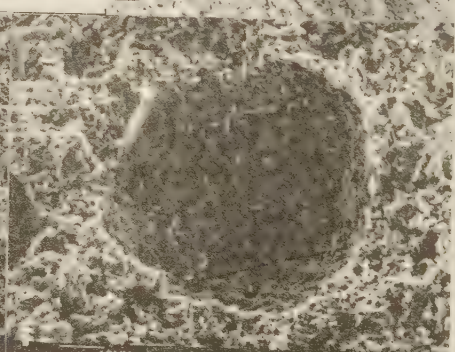
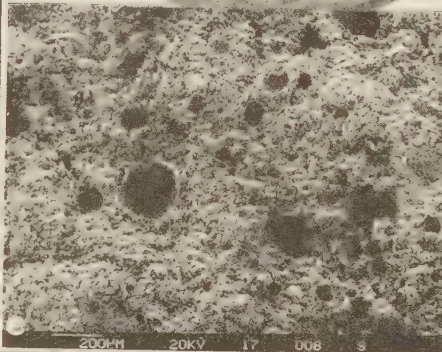
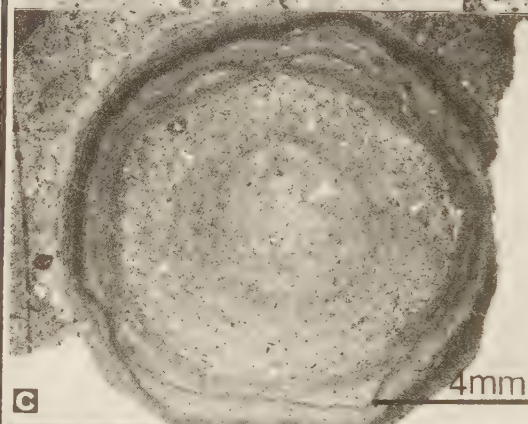
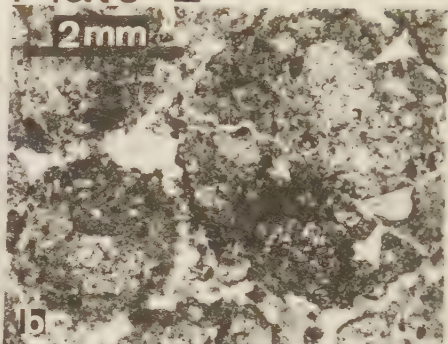
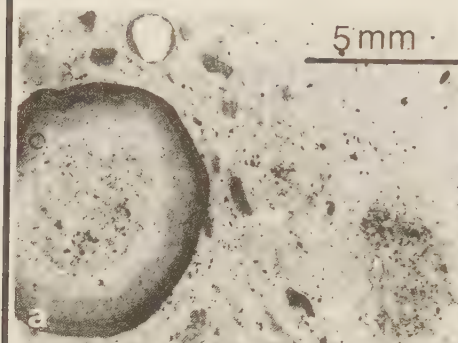
(a) C-lapilli concentrated above and below a vesiculated tuff layer. Some of the aggregates are partly incorporated into the tuff, indicating the entire layer was deposited (and later compacted) as aggregates and ash clots.

(b) Ignimbrite I at location 94, east of Laacher See, showing the light colored co-ignimbrite ash layer in the upper part of the deposit. Associated R(fall)-lapilli are concentrated beneath the fallout ash.

(c, d) Overview and detail of R-lapilli-bearing ignimbrite II at location 95.

(e, f) Ignimbrite of the ULST (loc. 83). Fine-grained ash is enriched in the upper part of the ignimbrite, and was presumably formed by settling of the elutriation cloud (uppermost 0.5 - 1 cm). The ash is associated with C(Flow)- and some R(Fall)-lapilli, illustrating the fact that (i) accretionary lapilli in ignimbrites are related to the elutriation cloud and (ii) two different types of accretionary lapilli may occur in the same deposit.

Plate 2



200 μm 20KV 17 008 S

200 μm 20KV 17 010 S

Erläuterungen zu Tafel 2

(a) R(Flow)-Lapillus mit gradierter Rinde im Dünnschliff. In der Matrix sind zahlreiche Fragmente abgelöster Rinde sowie der Kern eines weiteren Aggregats zu erkennen (Probe: Top des MLST-Ignimbrits, Lok. 82).

(b) C-Typ Lapilli im Dünnschliff. Die Aggregate enthalten zahlreiche, grobkörnige Bimspartikel und Kristallkörner (Basale LLST, Lok. 78).

(c, d) Rmult-Lapillus mit alternierenden Lagen gröberer und sehr feinkörniger Asche. Im Zentrum des Kerns wie an Grenze Kern - Rinde bilden die Aschenpartikel einlockeres Gefüge mit punktförmigen Kontakten (Probe: Lok. 15).

(e, f) Interngefüge eines Lapillus mit Blasen. Die Aschenpartikel sind parallel der Blasenwände eingeregelt (Probe der MLST).

Explanations of Plate II

(a) Photomicrograph of R-lapillus with graded rim. Numerous rim fragments and another core are distributed in the matrix. The rim may have been abraded either on penetrating into the ash layer or during deposition into the still moving ash flow (top ash layer of MLST-ignimbrite, loc. 82).

(b) Photomicrograph of C-lapilli. These aggregates accreted numerous coarse-grained pumice particles and crystal fragments (basal LLST, loc. 78).

(c, d) Photomicrograph of a complex R_{mult}-lapillus showing discontinuous layering of the rim by alternating coarser grained and very fine-grained ash. The center of the core as well as the core - rim boundary is formed by loosely packed ash particles, which are in point contacts with each other (loc. 15).

(e, f) SEM - image showing the internal fabric of a vesicular lapillus from the MLST. During vesicle formation particles may be displaced and rotated parallel to the vesicle wall.

4.2 Aufbau, Struktur und Granulometrie akkretionärer Lapilli

Aufbau und Korngrößenverteilung der akkretionären Lapilli hängen ab von: (a) ihrer Größe, (b) der Entfernung vom Eruptionszentrum und (c) von ihrer Entstehung während einer Fall-Fließ- oder Surge-Ablagerung. Die Reihenfolge, in der die einzelnen Aggregattypen vorgestellt werden, entspricht der Reihenfolge zunehmender Transportkraft und Strömungsenergie des Transportsystems.

4.2.1 Akkretionäre Lapilli der Fallout-Aschen (R(Fall)-Typ)

Aufbau

R(Fall)-Lapilli sind kugelig bis schwach elliptisch geformte Aschenaggregate. Die äußere, feinkörnige Rinde bedingt eine glatte Oberfläche, daneben treten aber auch höckerige, blumenkohlähnliche Oberflächenformen auf. Aggregate aus schlotnahen Ablagerungen sind häufig zu (Rotations)Ellipsoiden geformt. Das Achsenverhältnis kleinster : längster Durchmesser (D_s/D_l) reicht bis 0.55 (Abb. 4-9). Von der elliptischen Abplattung sind die Kerne stärker betroffen als die Gesamtform Kern + Rinde. Die Rinde gleicht durch asymmetrische Verdickung die Abplattung des Kerns teilweise aus und erhöht so die Kugeligkeit der Gesamtform. Trotzdem ist die Dicke der Rinde unabhängig von der Aggregatgröße. Akkretionäre Lapilli aus Surges haben allerdings eine dünnere Rinde als solche aus Elutriationswolken pyroklastischer Ströme (s. auch Kap. 4.2.3).

Die Kerne bestehen überwiegend aus einem lockeren, porösen Partikelagglomerat, in dem die Aschenpartikel ein kartenhausähnliches Gefüge mit punktförmigen Kontakten bilden (Tafel 2 und 3). Die Interpartikelporosität ist in diesen Aggregaten sehr hoch, bis zu 50 %; ihre mittlere Dichte beträgt etwa 1200 kg/m^3 .

Die feinkörnige Rinde ist entweder intern gradiert, oder es gibt einen zweiten Korngrößensprung zwischen einem grobkörnigeren Mantel innen und der feinkörnigsten, äußersten Rinde. Abgesehen von diesem äußeren Bereich bilden die Aschenpartikel in der Rinde ebenfalls ein Kartenhausgefüge. Multiple Rinden von R-Typ Lapilli bestehen entweder aus unregelmäßig konzentrischen Schalen aus alternierend grobem und feinem Korn oder aus diskontinuierlichen, feinkörnigen Schalen (Tafel 2). Punktförmige Anlagerungen grobkörnigerer Aschenhäufchen führen auf der Oberfläche zu blumenkohlähnlichen oder höckerigen Strukturen.

Kernlose Lapilli, eine Sonderform des R(Fall)-Typs, bestehen ausschließlich aus alternierend grob- und feinkörnigen Lagen nach dem Bauprinzip multipler Rinden. Die grobkörnigen Lagen entsprechen dem Mantel, die feinkörnigen Schalen der äußeren Rinde.

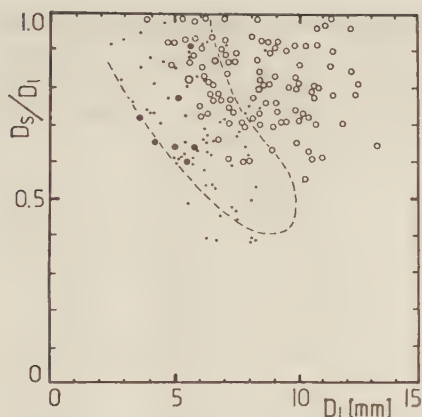


Abb. 4-9: Achsenverhältnis kürzester : längster Durchmesser D_s/D_l proximaler R(Fall)-Lapilli (Indizes engl.). Die Abplattung zu elliptischer Form wird durch die Rinde teilweise ausgeglichen. Symbole: ● Kerne; ○ Ganzform Kern + Rinde; gestrichelt C(Flow)-Lapilli; Größe der Symbole = Zahl der Meßwerte.

Fig. 4-9: Ratio of shortest to longest diameter (D_s/D_l) of proximal R(Fall)-lapilli. The cores of accretionary lapilli from proximal parts of the dust layer have a similar, but not as pronounced discoidal shape as lapilli from ignimbrites. Accretion of the fine-grained rim increases the sphericity resulting in higher D_s/D_l - values (loc. 15b and 94). Symbols: cores, total lapillus (core + rim); stippled line = variation of flow-lapilli; size of dots indicates number of measurements.

Granulometrie

Aggregatkerne

Das Korngrößenspektrum der agglomerierten Asche ist mit ca. 0.5 Gew.% > 0.25 mm nach oben begrenzt. Die Verteilungsmaxima der bimodalen Verteilung liegen bei etwa 5 - 15 μm bzw. oberhalb 50 μm Korngröße. Dazwischen liegt ein fixes Verteilungsminimum bei 40 - 50 μm . Die Asche ist mit Inman-Werten von 1.6 - 1.9 mäßig sortiert.

Große akkretionäre Lapilli über 10 mm Durchmesser sind systematisch grobkörniger als kleine Aggregate (Tab. 4-1; Abb. 4-10). Bei gleicher Kornobergrenze weichen die Mediane um ca. 5 μm voneinander ab.

R(Fall)-Lapilli aus Surge - Elutriationswolken sind etwas grobkörniger: Der Anteil der Fraktion > 0.25 mm ist leicht erhöht; das feinkörnige Verteilungsmaximum liegt bei 15 μm , der Median variiert von 23 - 30 μm . In einem ternären Variationsdiagramm der Kornverteilung läßt sich ein Variationsfeld für R(Fall)-Lapilli abgrenzen (Abb. 4-11).

Tabelle 4-1: Korngrößenverteilung unterschiedlich großer R(Fall)-Lapilli; Lok. 36 und 41.

Table 4-1: Grain-size distribution of ash from R(Fall)-lapilli of different size.

Sample:	Loc. 36		Loc. 41	
Agg. size:	> 10 mm	< 7 mm	> 10 mm	< 7 mm
Fract. (mm):	Weight %		Weight %	
> 0.250	0.24	0.36	0.52	0.53
0.177	0.42	0.50	0.61	0.64
0.125	1.32	1.45	1.43	1.45
0.090	4.41	3.63	6.85	5.00
0.063	7.72	5.14	9.65	6.68
0.045	5.21	7.51	7.59	4.30
0.030	11.40	10.91	11.52	11.43
0.020	12.46	- -	11.19	10.53
0.015	9.50	20.08	9.15	9.31
0.010	14.09	- -	13.11	14.58
0.005	14.59	30.05	10.72	14.75
< 0.005	17.64	20.36	17.64	20.80

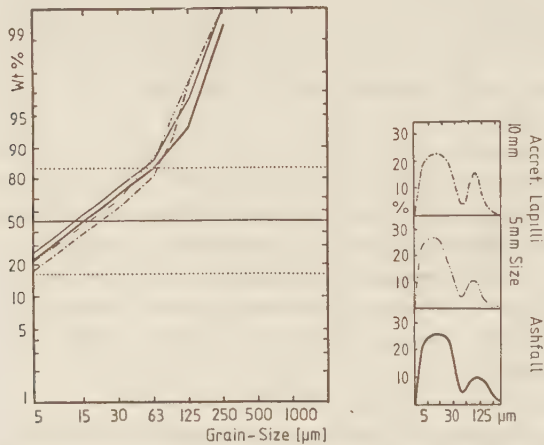


Abb. 4-10: Kornverteilung der Asche in R(Fall)-Lapilli (gestrichelt). Größere Aggregate binden mehr Fraktion > 63 µm als kleinere. Im Aschenfallout (fette Linien) ist das gleiche Verteilungsminimum bei 45 µm ausgebildet wie in den akkretionären Lapilli (Probe Lok. 41).

Fig. 4-10: Grain-size variation of ash from R-lapilli. Larger aggregates accrete larger amounts of ash > 63 µm than smaller ones. Grain-size distribution of the dust layer is similar to the distribution of the related accretionary lapilli (loc. 41).

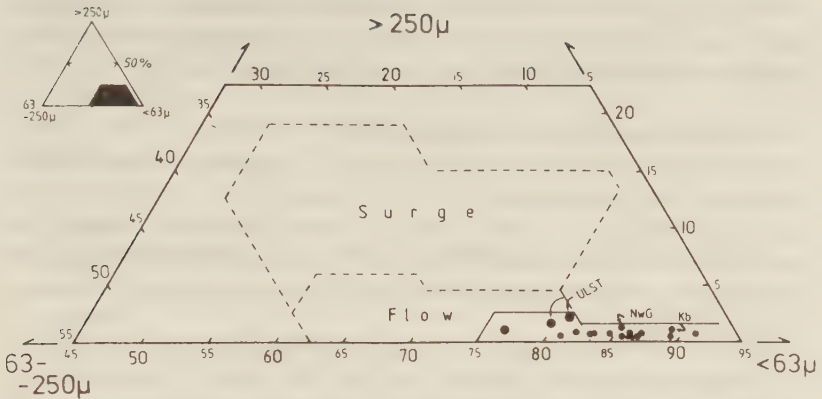


Abb. 4-11: Ternäres Diagramm der Korngrößenvariation in R(Fall)-Lapilli. Fall-Lapilli aus Surge-Wolken sind grobkörniger als solche aus Elutriationswolken von Ignimbriten. Beachte, daß die Aggregate der Lok. Krahenberg (Kb) und Neuwied-Gladbach (NwG) gegenüber den übrigen Proben der MLST grobkörniger sind.

Fig. 4-11: Ternary ash-size variation diagram for R(Fall)-lapilli. Fall-lapilli found in surge deposits of the ULST are coarser grained than those of the MLST. Note that accretionary lapilli of locations Krahenberg (Kb) and Neuwied-Gladbach (NwG) contain a higher proportion of ash > 250 µm than the lapilli of the other MLST-samples.

Aggregatrinden

Das Korngrößenspektrum der Asche ist in den Rinden signifikant feinkörniger: Die Kornobergrenze liegt bei etwa 125 µm. Die Kornverteilung ist wie in den Kernen bimodal, die Maxima liegen bei 5 und oberhalb 50 µm. Das fixe Verteilungsminimum bei 0.04 - 0.05 mm ist mit den Kernen identisch. Die Rinde akkretionärer Lapilli aus Surge - Elutriationswolken erscheint grobkörniger. Das kann u.U. ein Präparationseffekt sein, weil die Rinde dünner und eine saubere Trennung vom Kern schwieriger ist. Der Median schwankt um 10 µm, die Sortierung nach Inman ist mit Werten von 1.7 - 1.9 ebenfalls mäßig.

Der innere, grobkörnigere, als Mantel bezeichnete Teil der Rinde kann bei größeren Aggregaten von der feinkörnigsten, äußeren Rinde abgetrennt und separat analysiert werden, um die systematische Korngrößenabnahme nach außen in verschiedenen Zonen eines Aggregats herauszustellen (s. Abschn. 4.3).

Mit zunehmender Entfernung vom Eruptionszentrum nimmt die Korngröße der agglomerierten Asche systematisch ab. Kerne akkretionärer Lapilli distaler Ablagerungen (z.B. Kb) entsprechen im Korngrößenspektrum dem Mantel akkretionärer Lapilli aus proximalen Ablagerungen (z.B. 94). Die äußere Rinde ist davon nicht betroffen.

Die in Entfernungen > 10 km wiederansteigenden Gehalte der Fraktionen > 0.25 mm (1.2 Gew.% in den Aggregaten der Lok. NWG; 17 km östlich des Laacher Sees) erklären sich aus der Überlagerung von Aschensedimentation und plinianischem Bimsfall (Kapitel 6.3.3).

Korngrößenvergleich mit der Trägerschicht

Mit zunehmender Transportweite nimmt die Korngröße des Aschenfallouts systematisch ab. Die Aggregatkerne sind zwar an einer betrachteten Lokalität stets grobkörniger als die entsprechende Matrix, sie korrelieren aber mit einer schlotnäheren Lokation. Die Verteilungscharakteristika der Ko-Ignimbrit Asche sind mit den Kernen der akkretionären Lapilli identisch. Insgesamt gesehen bedeutet das eine Agglomeration der Aschenwolke ohne weitere Korngrößen Selektion.

Dichte Komponenten

Der Anteil an Kristallen und Xenolithfragmenten, deren Dichte über der des vulkanischen Glases liegt, beträgt in den akkretionären Lapilli < 30 bis < 50 Gew.%. Generell ist er damit höher als im Aschenfallout der gleichen Lokalität, was mit der größeren Kornverteilung der Aggregate korrespondiert. Innerhalb des einzelnen Aggregats nimmt der Gehalt parallel zu Korngrößenabnahme vom Kern über Mantel zur Rinde stetig ab (Tab. 4-2).

Tabelle 4-2: Verteilung dichter Komponenten in R(Fall)-Lapilli (in Phi-Fractionen).

Table 4-2: Weight percentage of crystals + lithics in different phi-fractions of ash from Fall-lapilli and fallout ash.

Sample:	Loc. 94	Loc. 41	Loc. Kb
Fract. (mm):	Wt. %	Wt. %	Wt. %
<i>Fallout ash</i>			
> 0.250	43.7	38.1	
0.125	18.0	22.7	39.9
0.063	23.8	22.2	20.9
0.030	27.7	29.1	20.8
<i>Cores</i>			
> 0.125	47.3	44.9	35.7
0.063	42.6	35.3	27.9
0.030	36.6	31.7	27.6
<i>Mantle</i>			
> 0.063	31.3		23.1
0.030	33.9		37.2
<i>Outer rim</i>			
> 0.063	42.1		
0.030	29.8		

Der Gehalt dichter Komponenten in akkretionären Lapilli ist entfernungsabhängig: In Aggregaten aus proximalen Ablagerungen sinkt er mit abnehmender Korngröße, in solchen aus distalen Ablagerungen steigt er aber in der Fraktion 30 µm der Rinde wieder leicht an. Die gleiche Entwicklung macht sich im Gehalt dichter Komponenten des Aschenfallouts bemerkbar. Eine solche Abweichung läßt sich mit dem elektrostatischen Verhalten vulkanischer Asche erklären (Kap. 5.3).

4.2.2 Akkretionäre Lapilli der Ignimbrite (C- und R(Flow)-Typ)

Aufbau

Die Form der akkretionären Lapilli hängt von ihrer Größe und von der Entfernung zum Eruptionszentrum ab. Kleine C-Typ Lapilli sowie die Kerne des R-Typs sind bis etwa 4 mm Durchmesser kugelig, werden aber mit zunehmender Größe zu Rotationsellipsoiden mit teils extremen Achsenverhältnissen $D_S/D_I < 0.4$ abgeplattet (Abb. 4-13).

Die Rinde verbessert durch asymmetrische Anlagerung die Kugeligkeit des Aggregates, so daß die D_S/D_I - Werte der R-Typ Lapilli 0.5 nicht unterschreiten. Die Dicke der Rinde ist dabei unabhängig vom Durchmesser des Lapillus (Abb. 4-13).

Das Gefüge wird von konzentrischem Schalenbau und von Blasen bestimmt (Tafel 2). Sie sind entweder entlang konzentrischer Anlagerungsschalen aufgereiht, im Inneren unregelmäßig verteilt, oder in der Umgebung agglomerierter Bimspartikel angereichert. Über 80 % der akkretionären Lapilli der MLST-B sind blasig (Tabelle in Anhang). Die Aggregate phreatoplinianischer LLST-Aschen (Lok. 78) sind dagegen deutlich blasenärmer. Im allgemeinen sind die Blasen selten größer als 0.5 mm, wobei ihre Größe kaum vom Aggregatdurchmesser abhängt.

Im Zentrum der akkretionären Lapilli ist ein unregelmäßiger Aggregatkeim von 1/3 bis 1/2 der Aggregatgröße entwickelt, um den sich in konzentrischen Schalen weitere Aschenpartikel anlagern. Plattige Schieferfragmente und Glimmer sind parallel zu den Schalen eingeregelt. In phreatoplinianischen Ablagerungen scheinen auch grobkörnige Partikel - Bimse oder Kristallkörner - als Agglomerationskeime zu dienen (Tafel 2). - Oder sind hier die grobkörnigen Partikel wie andere Partikel auch aus der Aschenwolke eingefangen und angelagert worden? Diskusförmige Lapilli entstehen durch vermehrte Aschenanlagerung in einer Ebene, d.h. die Abplattung kann primär sein und muß nicht unbedingt auf Plättung durch Impakt oder durch Kompaktion zurückgeführt werden (Abb. 4-14). Etwa 2 % der akkretionären Lapilli werden als Doppelapilli aus zwei Einzelaggregaten oder deren Keime aufgebaut. Beide Aggregate sind während der Bildung zusammengestoßen und werden von gemeinsamen Anlagerungsschalen zu einem Aggregat umschlossen.

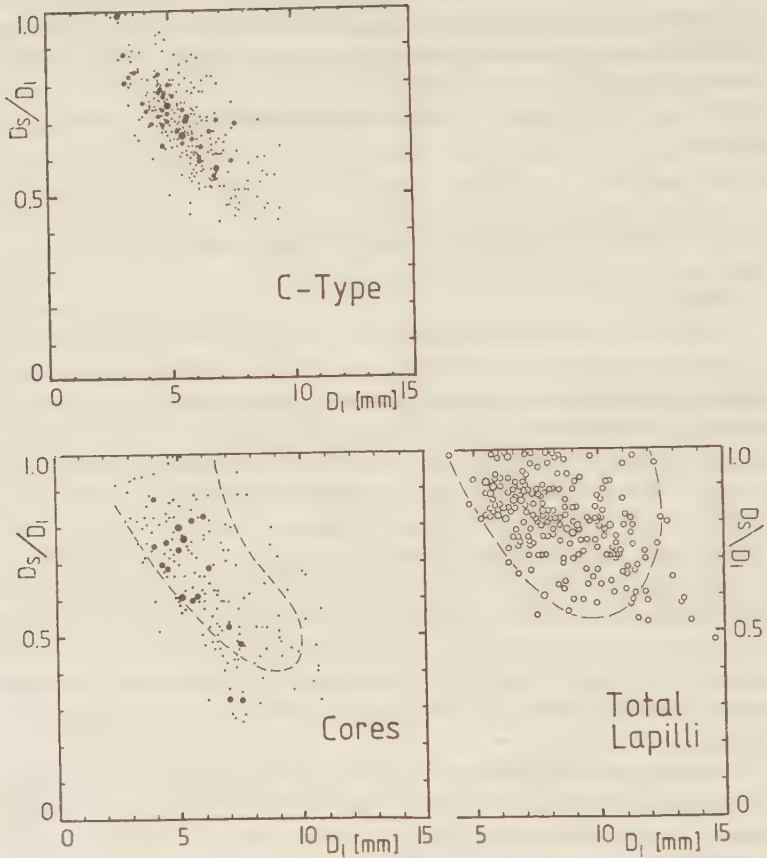


Abb. 4-12: Achsenverhältnis D_s/D_l gegen D_l von Aggregaten aus Ignimbriten. C(Flow)-Lapilli und Kerne der R(Flow)-Lapilli sind mit zunehmender Größe (rotations)elliptisch geformt. Die feinkörnige Rinde gleicht die Abplattung teilweise aus. Symbole: ● Kern-Typ und Kerne; ○ Ganzform Kern + Rinde; Feld dichtester Punktbesetzung aus Bild a.

Fig. 4-12: Ratio of shortest to longest diameter (D_s/D_l) versus D_l of accretionary lapilli from ignimbrites. C-lapilli and the cores of R-lapilli are similarly roller-shaped, but accretion of the fine-grained rim increases the sphericity of the R-type. This makes clear that the discoidal shape is a primary feature rather than caused by impact or any other mechanical deformation: upon deformation the degree of flattening of the

cores of R-type lapilli would be less or equal than that of the total lapillus (core + rim), which is the opposite of the observed relation.

● C-type and R-type cores; ○ total R-type (core + rim); stippled line, variation of data from Fig. a.

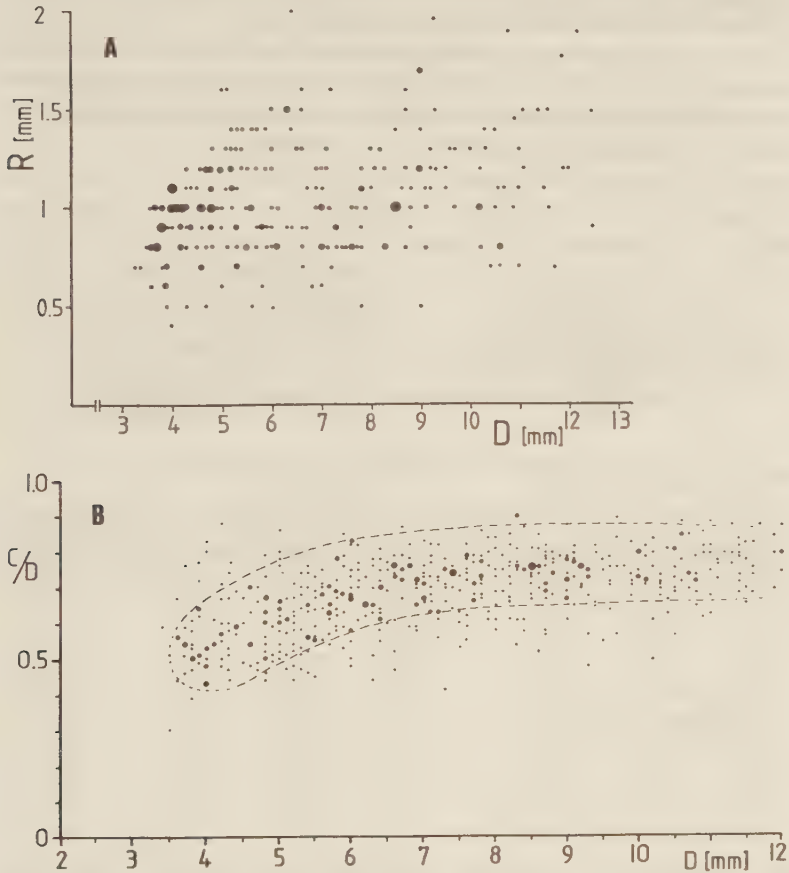


Abb. 4-13: Bild a zeigt die Dicke der Rinde R in mm gegen den Gesamtdurchmesser D aufgetragen; Bild b zeigt das Verhältnis von Kerndurchmesser C und Gesamtdurchmesser D (C/D gegen D). Größe der Datenpunkte = Anzahl der Meßwerte.

Fig. 4-13: Thickness of fine-grained rim relative to the total size of accretionary lapilli. (a) Thickness of rim R in mm versus total diameter D in mm. (b) Ratio of core diameter C to total diameter D (C/D) versus total diameter D. The thickness of the rim is not directly related to the size of the lapilli, but remains relatively constant within a certain range.

Die Aschenpartikel bilden im Kern ausnahmslos ein dichtes Gefüge mit überwiegend flächenförmigen Kontakten. Feinkörnige Partikel füllen die Zwickel zwischen groben Aschenkörnern (Tafel 4). Daher ist die Interpartikelporosität um mindestens 10 % geringer (30 - 40 %) als in Fall-Lapilli; die mittlere Dichte beträgt 1600 kg/m^3 .

Die Rinde der R(Flow)-Lapilli ist entweder intern gradiert oder in einen inneren Mantel und eine äußere Rinde zweigeteilt. Die Aschenpartikel bilden analog zum Mantel der R(Fall)-Lapilli ein Kartenhausgefüge mit punktförmigen Kontakten. Bei R(Flow)-Lapilli ändert sich also an der Grenze Kern / Rinde neben der Korngröße auch das Partikelgefüge.

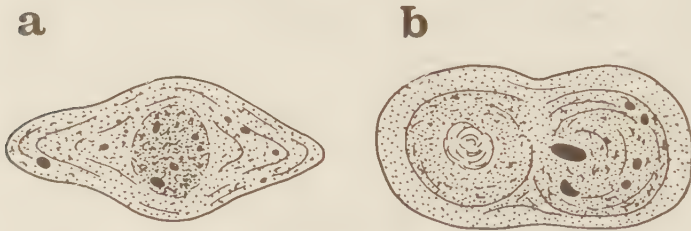


Abb. 4-14: Aufbau elliptischer Aggregate (a) und Doppellapilli (b).

Fig. 4-14: Internal structures of (a) roller-shaped accretionary lapilli and (b) twin lapilli. Aggregates consist of a more or less spherical, disordered nucleus surrounded by asymmetrical ash layers. Twin lapilli are accretionary lapilli consisting of two cores which are enclosed by a common ash envelope after their impact contact.

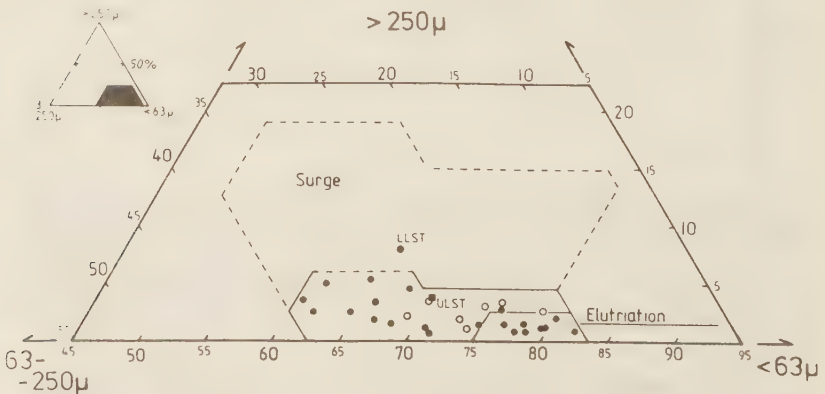


Abb. 4-16: Ternäres Diagramm zur Korngrößenverteilung in Flow-Lapilli. Zwischen C-Typ und R-Typ Lapilli besteht in der Korngrößenverteilung kein systematischer Unterschied. Symbole: ● Kern-Typ; ○ Rinden-Typ; Probe ULST.

Fig. 4-16: Ternary ash-size variation diagram of accretionary lapilli from ignimbrites. Different types of accretionary lapilli from ignimbrites (C- and cores of R-type), as well as lapilli from different ignimbrites (MLST and ULST), show similar ash-size distributions. It suggests that this is the ash-size distribution typical of ignimbrite-related accretionary lapilli. Symbols: ● core-type; ○ rim-type, ULST sample.

Granulometrie

In Flow-Lapilli sind generell nur 1 - 2.5 Gew.% > 0.35 mm Korngröße agglomeriert. Das Maximum der unimodalen Kornverteilung liegt bei 30 - 63 µm; der Median schwankt zwischen 30 und 50 µm. Die Korngrößenverteilung ist mäßig sortiert (Inman-Werten von 1.5 - 1.9). Die akkretionären Lapilli der phreatoplinianischen LLST-Asche (Lok. 78) haben eine Korngröße bis > 1 mm - dementsprechend ist die Asche schlecht sortiert (Inman-Wert 2.9). Im ternären Variationsdiagramm zeigt sich die Übereinstimmung der Korngrößenverteilung von C- und R-Type Lapilli (Abb. 4-15).

Tabelle 4-3: Korngrößenverteilung unterschiedlich großer C(Flow)-Lapilli.

Table 4-3: Grain-size distribution of ash from C(Flow)-lapilli of different size.

Sample:	Loc. 7b			Loc. 94 (Layer I)		
Aggreg. size Fract. (mm):	> 5 mm	5 - 3 mm Weight %	< 3 mm	> 4 mm	4 - 2 mm Weight %	< 2 mm
> 0.350	0.62	0.75	0.74	0.42	0.43	0.82
0.250	0.90	1.00	0.98	0.38	0.43	0.60
0.177	2.19	2.84	2.46	1.15	1.02	1.15
0.125	4.09	4.71	3.54	2.31	3.33	2.14
0.090	8.91	9.21	7.64	6.79	7.36	7.86
0.063	15.13	14.83	11.73	11.13	9.97	9.11
0.045	11.67	15.64	12.76	9.79	17.08	13.77
0.030	13.52	11.47	9.78	14.95	11.55	12.98
0.020	10.48	10.10	9.43	13.40	10.93	12.41
0.015	6.71	6.23	7.75	6.16	7.65	7.46
0.010	8.26	8.32	8.73	11.05	10.13	10.22
0.005	6.18	4.79	6.54	7.72	6.64	7.10
< 0.005	11.28	10.11	17.91	14.76	14.74	14.37

Die Korngrößenverteilung ist weder von der Größe der akkretionären Lapilli (Tab. 4-3; Abb. 4-16), der Entfernung zum Eruptionszentrum noch von der Ignimbritfazies (Overbank- und Tal-Fazies) systematisch abhängig.

Die Verteilungscharakteristika in den Aggregatrinden sind mit den R(Fall)-Lapilli identisch.

Korngrößenvergleich mit der Trägerschicht

In akkretionären Lapilli setzt erst oberhalb 45 μm eine Korngrößenselektion gegenüber der Aschenmatrix des Ignimbrits ein. Im Korngrößenvergleich sind Elutriationsasche und C-Typ Lapilli des ULST-Ignimbrits (Lok. 83) weitgehend identisch (Abb. 4-17): Aus pyroklastischen Strömen elutrierte Partikel werden ohne weitere Korngrößenselektion agglomeriert.

Mit zunehmender Transportweite nimmt die maximale Korngröße in Ignimbriten ab. Da in akkretionären Lapilli bis in ca. 11 km Entfernung vom Laacher See keine Korngrößenabnahme beobachtet wurde, gleichen sich beide Kornspektren mehr und mehr an, bis sie schließlich ab ca. 9 km Entfernung vom Laacher See nahezu identisch sind. Daraus kann man folgern, daß akkretionäre Lapilli das Kornspektrum distaler Bodenwolken, die aus pyroklastischen Strömen hervor gehen, ohne weiter Selektion agglomerieren.

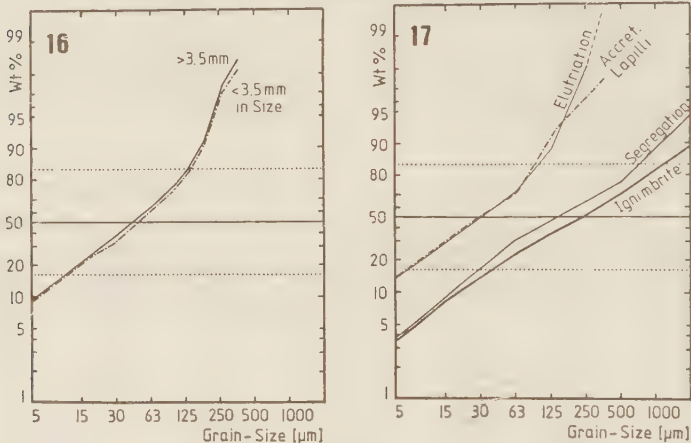


Abb. 4-16: Korngrößenverteilung der agglomerierten Asche in unterschiedlich großen akkretionären Lapilli.

Fig. 4-16: Cumulative grain-size distribution of ash from accretionary lapilli of different sizes. There is no systematic difference in ash-size variation of small and large accretionary lapilli of the same sample. The analyzed accretionary lapilli bracket the spectrum of lapilli sizes in a particular sample: small accretionary lapilli are from below the mode, large ones are from above the mode.

Abb. 4-17: Vertikale Korngrößenvariation eines Ignimbrits der ULST. Die Kornverteilung der Elutriationsasche ist mit der Kornverteilung der Asche in den C-Lapilli weitgehend identisch.

Fig. 4-17: Grain-size variation throughout a vertical section of an ignimbrite (ULST; loc. 83). The grain-size distribution of the elutriation ash and the ash of C-type lapilli are similar. Accretionary lapilli from ignimbrites agglomerate the grain-size spectra of elutriation clouds.

Dichte Komponenten

Der Anteil an Xenolithfragmenten und Kristallen beträgt in den akkretionären Lapilli 20 - < 50 Gew.%. Mit abnehmender Korngröße nimmt der Gehalt dichter Komponenten ebenfalls ab (Tab. 4-4). In den Aggregaten sind dichte Komponenten relativ zur Matrix angereichert. Dieser Unterschied verstärkt sich mit zunehmender Entfernung vom Laacher See, weil der Gehalt in der Trägerschicht abnimmt, in den Aggregaten aber mehr oder weniger konstant bleibt. Das bedeutet entweder selektive Agglomeration, oder die Aggregate werden (weit?) vor dem eigentlichen Ablagerungsort gebildet.

Im proximalen Bereich scheint es eine Abhängigkeit der Komponentenverteilung von der Ignimbritfazies zu geben: Der Gehalt dichter Komponenten ist in akkretionären Lapilli der Talfazies (Lok. 87a) generell höher als in Aggregaten der Overbankfazies (Lok. 23), was auch geringere Transportweite in der Overbankfazies (Lok. 95) nicht kompensiert.

Tabelle 4-4: Verteilung dichter Komponenten in Flow-Lapilli.

Table 4-4: Weight percentage of crystals + lithics in different - fractions of ash from Flow-lapilli.

Sample:	Loc. 94		Loc. And		Loc. WB	Loc. 87a	Loc. 23
Fract. (mm)	Weight %		Weight %			Weight %	
	Matrix	Cores	Matr.	Cores	Cores	Cores	Cores
> 0.250	36.5	---	43.0	---	---	35.2	28.6
0.125	37.1	47.8	30.9	43.1	46.5	42.5	29.5
0.063	33.6	43.3	18.1	36.4	38.5	37.3	27.6
0.030	24.3	31.9	---	32.8	29.5	27.1	24.6

Sample : Loc. 95 (Ignimbrite II)

Fract. (mm)	Weight %			
	Matr.	Core	Mantle	Outer rim
> 0.250				
0.125	35.9	33.9	---	---
0.063	31.7	30.1	25.7	21.1
0.030	---	32.1	25.3	21.4

4.2.3 Akkretionäre Lapilli der Surge - Ablagerungen (C- und R(Surge)-Typ)

Aufbau

Im Gegensatz zu den Flow-Lapilli sind diese Aggregate infolge ihrer geringeren Größe kaum elliptisch abgeplattet. Blockige Aschenpartikel > 0.5 mm Korngröße sind im Zentrum eines Lapillus angereichert, während im Randbereich die Partikel kaum größer als $0.2 - 0.3$ mm sind. Konzentrischer Schalenbau wird ab ca. 3 mm Durchmesser erkennbar. Plattige Partikel sind überwiegend tangential, aber auch quer zum Schalenbau orientiert. Blasen sind signifikant seltener als in den akkretionären Lapilli aus den MLST-Ignimbriten: Weniger als 40% sind blasig (Anhang). Blockige, blasenarme Partikel bilden ein dichtes Gefüge mit vorwiegend flächenförmigen Kontakten.

Die Rinde der R(Surge)-Lapilli ist signifikant dünner als die des R(Flow)-Typs. Im Diagramm C/D gegen D ist die Punktwolke zu höheren C/D - Werten verschoben (Abb. 4-18).

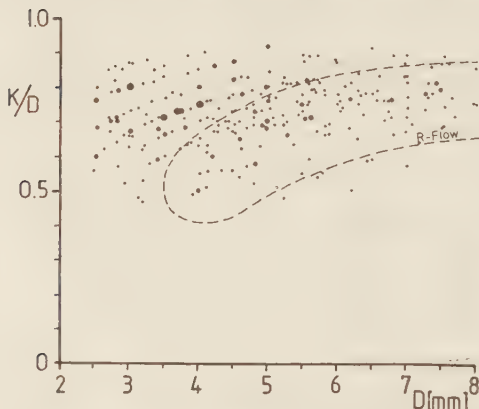


Abb. 4-18: Kerndurchmesser C im Verhältnis zu Gesamtdurchmesser D (C/D gegen D). Surge-Lapilli haben generell eine dünnere Rinde als Flow-Lapilli, wodurch sich die Punktwolke zu höheren C/D-Werten verschiebt.

Fig. 4-18: Proportional thickness of fine-grained rim relative to the size of accretionary lapilli (C/D versus D). Generally, accretionary lapilli from surges have a thinner rim than those of pyroclastic flows (as shown by higher C/D - ratios).

Granulometrie

Die Korngröße der agglomerierten Asche ist bei etwa $1 - 2$ mm nach oben begrenzt. Die Kornverteilung ist generell unimodal, hat aber im Gegensatz zum Flow-Typ einen langgezogenen groben Schwanz. Dementsprechend ist die Asche schlecht sortiert: Innian - Werte $2.0 - 2.4$. Das Verteilungsmaximum liegt zwischen 45 und 90 μm Korngröße; der Median variiert zwischen 30 und 50 μm . Generell sind proximal verbreitete R(Surge)-Lapilli feinkörniger als C-Typ Lapilli, so

daß im Drei-Komponenten-Variationsdiagramm beide Punktwolken voneinander getrennt sind (Abb. 4-19). Im Gegensatz zu Flow-Lapilli sind unterschiedlich große Surge-Lapilli auch in der Kornverteilung unterschiedlich: Aggregate < 2 mm Durchmesser sind grobkörniger als größere Aggregate; der Anteil > 0.25 mm ist deutlich erhöht (Tab. 4-5; Abb. 4-20).

In der feinkörnigen Rinde ist die Korngrößenverteilung bimodal, die Verteilungscharakteristika sind mit den Rinden anderer Aggregat-Typen identisch, sie scheint jedoch etwas grobkörniger zu sein (s. Kap. 4.2.1).

Korngrößenvergleich mit der Trägerschicht

In akkretionären Lapilli ist Asche ab ca. 30 μ m Korngröße gegenüber der Trägerschicht angereichert. Das zweite, grobkörnige Verteilungsmaximum der Matrix verursacht den groben Schwanz der Verteilung in den Aggregaten.

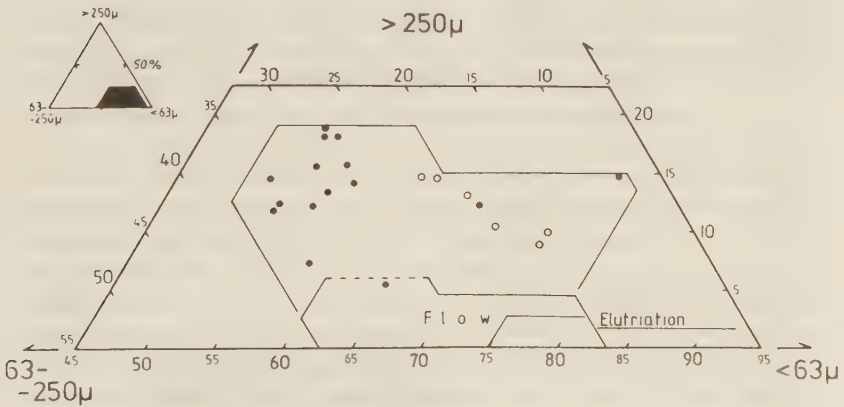


Abb. 4-19: Ternäres Diagramm der Kornverteilung in Surge-Lapilli. R(Surge)-Lapilli (○) sind systematisch feinkörniger als C(Surge)-Lapilli (●).

Fig. 4-19: Ternary ash-size variation diagram for accretionary lapilli from surge deposits. Generally, there is a much wider ash-size variation in surge-lapilli than in lapilli from ignimbrites or fallout deposits. In surges, R-lapilli (○), which only occur in proximal deposits, are systematically finer grained than C-lapilli, which occur in distal deposits or in proximal deposits of surges with a large proportion of entrapped water (as indicated by the post-emplacement vesiculation of the tuff).

Tabelle 4-5: Korngrößenverteilung unterschiedlich großer K(Surge)-Lapilli.

Table 4-5: Grain-size distribution of ash from C(Surge)-lapilli of different size.

Sample:	Loc. 12a		Loc. 83		Loc. Ah	
Aggreg. size:	1.4 mm	> 2 mm	1.4 mm	> 2 mm	1.4 mm	> 2 mm
Fract. (mm):	Weight %		Weight %		Weight %	
> 0.500	6.28	5.04	8.10	6.17		
0.350	3.92	2.88	3.52	2.55	3.06	1.49
0.250	4.19	3.72	3.75	3.32	2.36	1.86
0.177	4.47	4.61	3.68	3.47	2.84	2.65
0.125	7.83	7.66	6.91	6.85	6.16	5.83
0.090	9.97	10.54	9.07	9.33	9.56	10.82
0.063	11.61	12.20	10.34	12.29	11.41	11.30
0.045	10.97	8.37	9.87	7.29	11.99	9.87
0.030	9.20	10.49	8.48	9.72	11.53	12.30
0.020	6.27	7.22	7.66	7.41	10.00	10.89
0.015	4.12	4.94	3.28	5.70	3.74	5.77
0.010	5.94	6.78	7.81	8.18	8.06	8.85
0.005	5.81	6.37	6.62	7.41	8.65	7.52
< 0.005	9.43	9.18	10.82	10.31	10.64	10.84

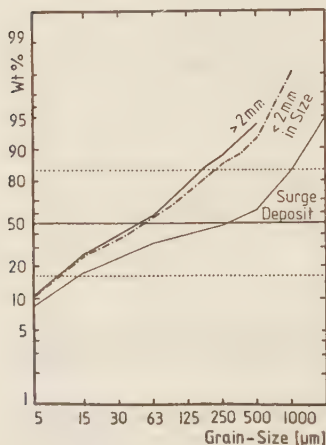


Abb. 4-20: Kornverteilung der agglomerierten Asche in verschieden großen C(Surge)-Lapilli. Kleine Aggregate sind gegenüber größeren grobkörniger. Zum Vergleich mit den Aggregaten ist die Verteilungskurve der Matrix (M) dargestellt (Loc. 83, Hangendes von B-16).

Fig. 4-20: Ash-size distribution of accretionary lapilli of different sizes. In contrast with those of pyroclastic flows, small surge-lapilli accreted a larger proportion of coarse ash than larger ones (loc. 83, above breccia layer B-16).

4.3 Zusammenfassung und Interpretation

Akkretionäre Lapilli sind in den feinkörnigen Ignimbriten und Surgeablagerungen der Laacher See Tephra als C- und R-Typ verbreitet. Der Rindentyp ist regional auf schlotnahe Ablagerungen bis etwa 5 km (?) vom Eruptionszentrum entfernt verbreitet. Mit zunehmender Transportweite geht die Rinde verloren - es gibt distal nur noch den C-Typ. In besonders geringmächtigen Ablagerungen oder in Blasentuffen tritt auch schlotnah der C-Typ auf. Innerhalb der Einzelschicht sind akkretionäre Lapilli in proximalen Ablagerungen entweder im Schichtoberteil angereichert (Lok. 82, 94/95, 41), oder sie sind an die Elutriationsasche gebunden (Lok.83). Distal sind sie unregelmäßig verteilt (Lok. Ah, And) (Abb. 4-21). Aschenfallablagerungen östlich des Laacher Sees konzentrieren akkretionäre Lapilli unterhalb der eigentlichen Aschenschicht, weil sie aufgrund ihrer höheren Fallgeschwindigkeit als erstes aus der Wolke sedimentieren.

Akkretionäre Lapilli sind in Ignimbriten schlechter sortiert als in Surges; d.h. sie haben ein breiteres Größenspektrum. Da mit zunehmender Entfernung vom Eruptionszentrum die maximale Größe schneller abnimmt als die mittlere Größe, verbessert sich die Sortierung mit der Transportweite in Ignimbriten stärker als in Surges. Die Unterschiede beruhen auf den unterschiedlichen Transportmechanismen in pyroklastischen Strömen und Surges.

In Form und Aufbau bestehen deutliche Unterschiede zwischen verschiedenen Gruppen akkretionärer Lapilli. Flow-Lapilli sind mit zunehmender Größe elliptisch geformt. Die asymmetrisch angelagerte Rinde gleicht die Abplattung teilweise aus, so daß die Kugeligkeit erhöht wird. Surge-Lapilli sind meist zu klein, um deutlich elliptisch geformt zu sein.

Intern bestehen Surge-Lapilli aus grobkörnigen Partikeln > 0.5 mm im Zentrum. Solche Agglomerationskeime fehlen meist in den anderen Aggregaten; Körner > 100 μ m sind aber immer unregelmäßig verteilt und von feinkörnigeren Partikeln umgeben. Das ist für die Diskussion der Haftkräfte wichtig. Die Kornkontakte der Einzelkörner in Flow- und Surge-Lapilli sind überwiegend Flächen : Flächen - Kontakte = dichtes Gefüge mit 30 - 40 % Porosität. Davon unterscheidet sich das Partikelgefüge der Fall-Lapilli mit punktförmigen Kontakten = lockeres Gefüge mit bis zu 50 % Porosität. An der Grenze Kern/Rinde ändert sich nicht nur sprunghaft die Korngröße, sondern in Flow- und Surge-Lapilli auch das Partikelgefüge: Zumindest im inneren, auch Mantel genannten Bereich der Rinde, bilden die Partikel punktförmige Kontakte.

Die Kornverteilung der agglomerierten Asche ist in verschiedenen akkretionären Lapilli unterschiedlich. Aggregate aus Surges sind die grobkörnigsten, die aus windverdrifteten Aschenwolken die feinkörnigsten. Ein Vergleich mit der Trägerschicht verdeutlicht, daß mit Ausnahme der Surges die Aschenwolke, in der die Aggregate entstanden sind, ohne Selektion agglomeriert wird und den Aggregatkern bildet. Da die Kornverteilung einer Aschenwolke neben der primären Kornverteilung von der Transportkapazität des Transportsystems entscheidend beeinflusst wird, spiegelt die Kornverteilung im Aggregatkern also auch die Transportkapazität der jeweiligen Wolke wider - demnach sollte die Kornverteilung mit der Transportweite abnehmen (Abb. 4-21). Als kritischer Parameter wurde der Anteil < 63 μ m herangezogen, weil

die maximale Korngröße (als 1/2 ϕ Siebfraction) in den untersuchten Proben nicht abnimmt, sondern sich nur der relative Anteil der größten Fraktion ändert. Die größte Fraktion ist aber für die Fall-Lapilli insofern nicht signifikant, da ihr Anteil aufgrund der besonderen Eruptionsbedingungen des Laacher See Vulkans zur Zeit der Bildung der Aggregate distal wieder ansteigt.

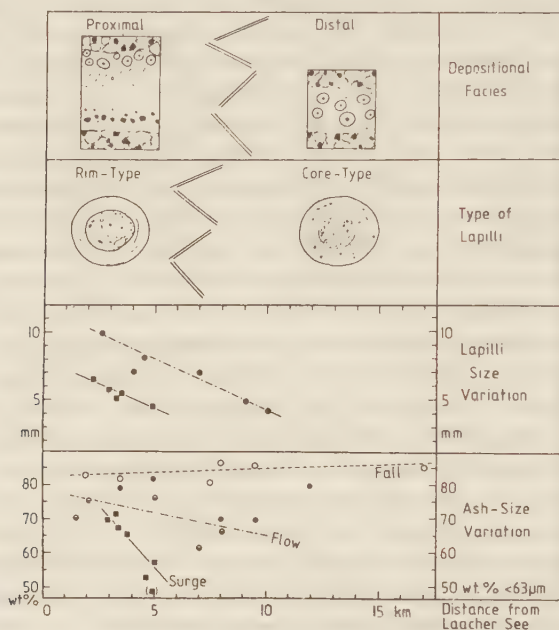


Abb. 4-21: Variation der Parameter Verbreitung, Rinde, Aggregatgröße und Anteil feinkörniger Asche < 63 μm in akkretionären Lapilli mit zunehmender Entfernung vom Eruptionszentrum.

Fig. 4-21: Summary of field characteristics and size-parameters of accretionary lapilli. In proximal deposits accretionary lapilli are concentrated in the upper part of discrete layers, whereas they are irregularly distributed in distal facies. R-lapilli are characteristic of proximal surge and flow deposits (except for those deposits with a large proportion of entrapped water, which contain C-lapilli); C-lapilli are characteristic of distal facies. Lapilli-size decreases as distance from vent increases. The amount of fine ash (< 63 μm) increases slightly with distance in accretionary lapilli from elutriation clouds, but it decreases strongly in accretionary lapilli from surges.

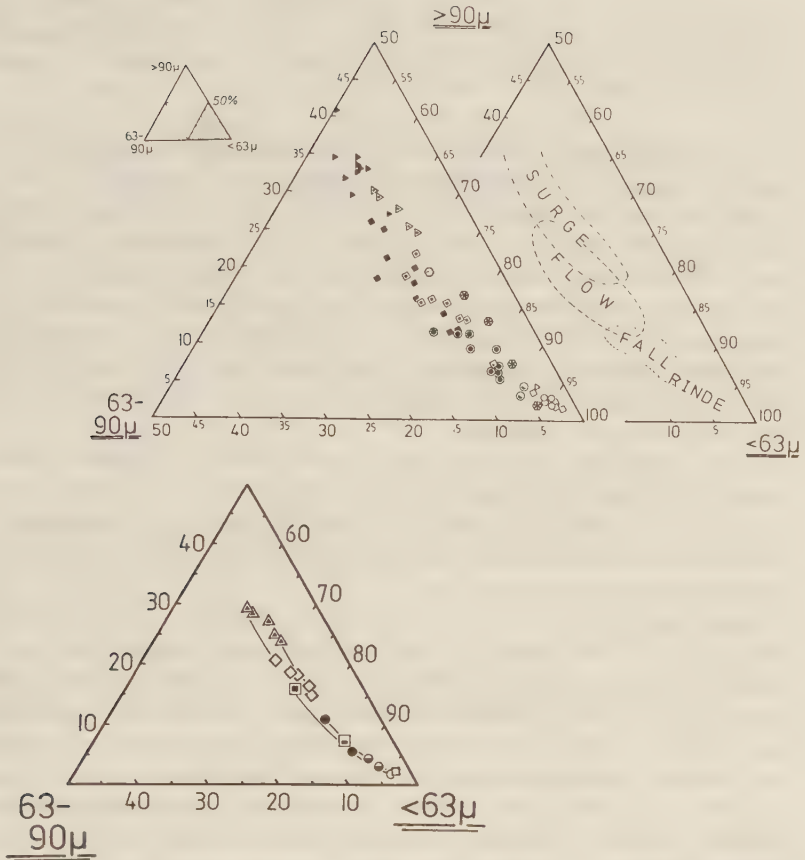


Abb. 4-22: Ternäres Kornverteilungsdiagramm der Asche in akkretionären Lapilli und der Aschenmatrix (Gesamtbild). Ausschnitt (a): Transformation der Kornverteilung von R(Surge)-Lapilli (▲) in die Kornverteilung von Flow-Lapilli (◇), sowie die Korngrößenabnahme innerhalb eines Aggregates vom groben Kern (■) über den Mantel (□) zur feinkörnigsten, äußeren Rinde (□).

Fig. 4-22: Ternary ash-size variation diagram for accretionary lapilli and ash matrix of Laacher See Tephra. The ash-size decrease from coarse surge-lapilli to fine fall-lapilli is directly related to the transport capacity, as accretionary lapilli agglomerate the ash of the cloud they come from.

Insert shows the calculated transformation of the ash-size distribution of R(surge)-lapilli ($\blacktriangle$) into flow-lapilli ($\blacklozenge$) by subtraction of the size-class $> 500 \mu\text{m}$ (agglomeration nuclei). A similar calculation would be meaningless for coarse-grained C(surge)-lapilli, as they contain a larger proportion of fraction 125 - 350 μm .

- In den Fall-Lapilli steigt der Anteil $< 63 \mu\text{m}$ mit zunehmender Entfernung vom Laacher See leicht an; d.h. distal verbreitete Aggregate sind feinkörniger als proximal verbreitete.
- In den Flow-Lapilli deutet sich südlich des Laacher Sees eine schwache Abnahme des Anteils $< 63 \mu\text{m}$ mit zunehmender Transportweite an. Nach Osten ist keine systematische Variation zu erkennen. Das kann darauf zurückzuführen sein, daß die Kornverteilung im schlotnahen Bereich durch Elutriation vorsortiert ist. Zweitens scheint die distale Bodenwolke, die aus den pyroklastischen Strömen hervorgeht, bis in 10 km Entfernung die aggregattypische Kornverteilung durch Korngrößenabnahme noch nicht unterschritten; d.h. die Bodenwolke hat im Entfernungsbereich um 10 km die Kornverteilung von proximalen Elutriationswolken, die ohne weiteres agglomeriert werden kann.
- In Surge-Lapilli nimmt der Anteil $< 63 \mu\text{m}$ mit zunehmender Transportweite ab - distal verbreitete C-Typ Lapilli sind somit grobkörniger als proximale R-Typ Lapilli

Innerhalb des Einzelaggregats nimmt die Korngröße vom groben Kern zur feinkörnigsten äußeren Rinde systematisch ab (Abb. 4-22). Das gibt erste Hinweise auf die Haftkraftverteilung während der Agglomeration der Asche.

Ein gutes Beispiel dafür, selbst wenn sich in der späteren Diskussion zeigen sollte, daß die Rinde in einem anderen Bereich oder Regime der Aschenwolke angelagert wird, ist die Transformierung der Kornverteilung von R(Surge)-Lapilli in die Kornverteilung von Flow-Lapilli (Abb. 4-22). In der simplen Modellrechnung wird die gröbste Fraktion $> 0.5 \text{ mm}$, die den Agglomerationskeim bildet, von der Gesamtsumme subtrahiert, und der Rest auf 100 % normiert - man erhält die allgemeine Kornverteilung von Flow-Lapilli. Diese Transformierung ist im Falle der grobkörnigeren C(Surge)-Lapilli unmöglich, da der Anteil 0.35 - 0.5 mm Korngröße größer ist als im R-Typ. Während der Bildung der R(Surge)-Lapilli wird aus der turbulenten Surgewolke ein Korngrößenspektrum an gröbere Partikel angelagert wie es allgemein durch Elutriation in pyroklastischen Strömen zur Aggregatbildung bereitgestellt wird. In Surges bedeutet das aber Korngrößenselektion durch die Agglomeration, da es keine vorsortierenden Prozesse, wie z.B. die Elutriation in pyroklastischen Strömen, gibt.

Die Korngrößenabnahme innerhalb der Rinde bedeutet stetig abnehmende Haftkräfte während der Rindenanlagerung - unabhängig von der Art der Haftkräfte.

Erläuterungen zu Tafel III

Auflichtfoto einer R(Fall)-Lapillus und REM-Fotos des Interngefüges. Typisch für diesen Aggregattyp ist das lockere Partikelgefüge mit Interpartikelporosität und punktförmigen Kontakten.

(a) Die Übersicht zeigt unregelmäßig verteilte, grobe Partikel in einer "Matrix" feiner Asche.

(b, c) Partikelgefüge mit hoher Interpartikelporosität im Kern. grobe Körner werden nicht direkt aneinandergelagert, sondern sind stets von feinasche umhüllt.

(d) Lagenbau einer multiplen Rinde. Auf grobkörnige Partikel, die im Kanten - Flächenkontakt zueinander stehen, folgt unmittelbar eine Schale sehr feinkörniger Asche.

(e) Textur der äußeren Rinde. Zwar werden die partikel mit abnehmender Korngröße zunehmend parallel zum Schalenbau angelagert, doch kann in kleinen Bereichen ein lockeres Gefüge ausgebildet sein.

Explanations of Plate III

Photomicrograph of R(fall)-lapillus and SEM - images illustrating the particle texture. A loose packed texture with inter-particle-porosity is common for this type of accretionary lapilli.

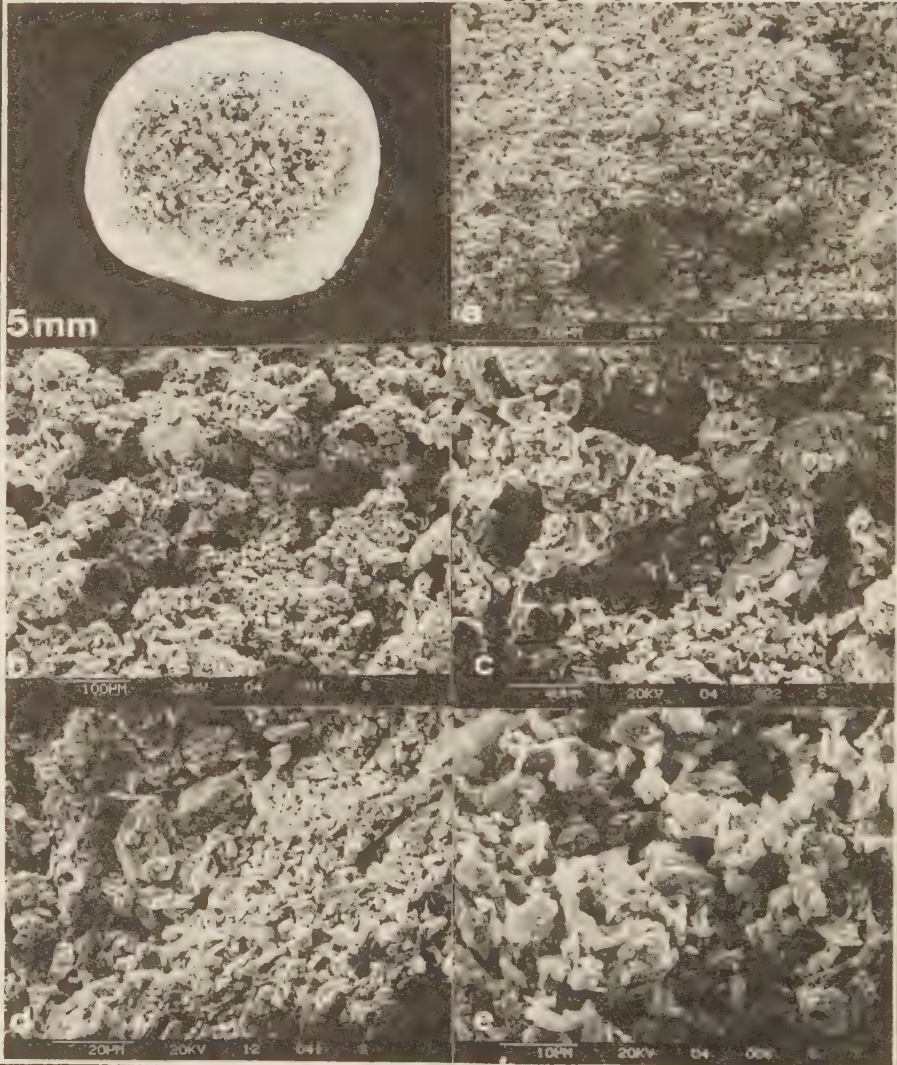
(a) Overview of a part of the core showing large grains irregularly distributed in a "matrix" of fine ash.

(b, c) Open framework of particles; large grains accreted fine ash that formed "bridges" between them.

(d) Layering of a multiple rim showing particles with edge to face contacts, followed by a layer of very fine ash.

(e) Texture of the outer fine-grained rim. With decreasing grain-size, particles may become more and more ordered parallel to the concentric shells, but in some parts an open framework predominates.

Plate 3



Erläuterungen zu Tafel IV

Elliptisch geformter R(Flow)-Lapillus und REM - Fotos des Interngefüges. Im allgemeinen ist in Horizontaltransportsystemen ein dichtes Partikelgefüge entwickelt.

(a, b, c) Übersicht und Details des Partikelgefüges im Kern. Große Partikel sind in einer "Matrix" aus feiner Asche verteilt, so daß die groben Partikel nicht direkt aneinandergelagert werden.

(d) Gefüge im der Rinde innen nahe dem Kern.

(e) Teilweise ist in den äußeren Bereichen der Rinde ein kartenhausähnliches Gefüge entwickelt, in dem die Körner untereinander nur punktförmig Kontakt haben. Die Partikeltextur der Rinde ist i.a. in allen Typen akkretionärer Lapilli ähnlich.

Explanations of Plate IV

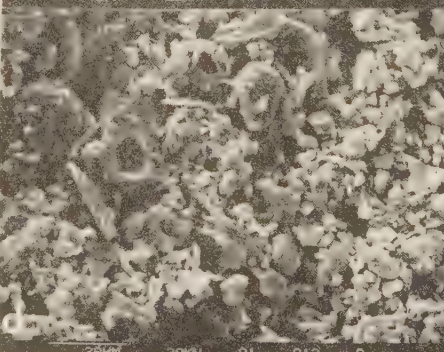
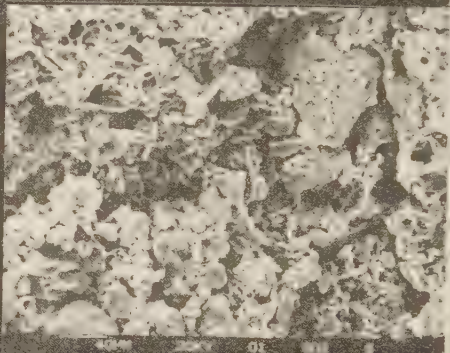
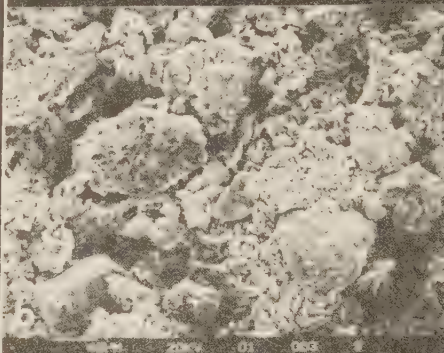
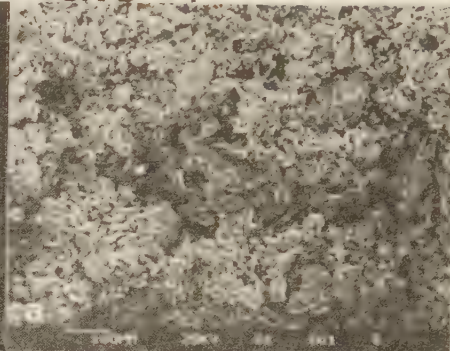
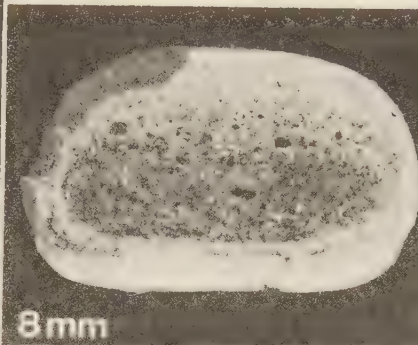
Photomicrograph of a roller-shaped R(flow)-lapillus. The SEM - images illustrate the internal particle texture. Generally, a densely packed texture is developed within the aggregates forming during horizontal transport of ash flows and surges.

(a, b, c) Overview and details of the core showing some large grains distributed in a "matrix" of fine ash, so that large grains do not contact each other directly.

(d) Particle texture of the rim close to the core.

(e) An open framework of ash particles is developed even in some parts of the outer rim. The particle texture is generally similar in all types of accretionary lapilli.

Plate 4



5. Technische Aggregatbildung

Allgemeines

In der Natur und in der Technik sind Partikelaggregate weit verbreitet. Ziel der technischen Aggregatherstellung ist es, aus kohäsionslosen, (fein)körnigen Rohstoffen ein Agglomerat mit definierten Eigenschaften zu produzieren (Rumpf, 1974; Schubert, 1979). Zur Prozeßführung müssen gezielt Agglomerationsverfahren ausgewählt werden, was Kenntnisse über die bei der Aggregatbildung wirksamen Kräfte, insbesondere die Partikelhaftung voraussetzt. Der Vergleich von Vulkanaschenaggregaten mit technisch hergestellten Aggregaten und den Verfahren ihrer Herstellung kann also wichtige Hinweise für das Verständnis der Bildungsprozesse natürlicher Partikelaggregate geben.

Für das Verständnis der Entstehung von Vulkanaschenaggregaten ist nur die sogenannte Aufbaugranulation von Bedeutung, bei der feinkörnige Partikel bei (Stoß)Kontakt aneinanderhaften und Aggregate bilden. Aufbaugranulation kann technisch in der lockeren Schüttung in einer Granuliertrommel, auf einem Granulierteller (Rollgranulation) oder in der Dispersion in einem Fluidbett (fluidisiertes Partikelgemisch) erfolgen (Rumpf, 1958b; 1974; Herrmann, 1979). Fluidbettgranulation ist für die Übertragung technischer Bedingungen auf natürliche, vulkaniklastische Systeme interessant, da akkretionäre Lapilli in der Suspension der Elutriationswolken teilweise fluidisierter Bodentransportsysteme entstehen.

5.1. Physikalische Grundlagen der Partikelhaftung

Kohäsionslose Partikel haften durch Kapillarkräfte von Flüssigkeitsbrücken zwischen den Partikeln, durch hochviskose Bindemittel oder durch Festkörperbrücken aneinander. Van der Waals'sche oder elektrostatische Anziehung bewirken ebenfalls ein Aneinanderhaften von Partikeln (Tab. 5-1).

Für die Entstehung von Vulkanaschenaggregaten sind Sinterbrücken und van der Waals'sche Kräfte ohne Bedeutung. Sinterbrücken (Verschweißung) zwischen den Partikeln kommen nicht in Betracht, da die untersuchten Ablagerungen unverschweißt sind; auch aus der Literatur ist kein Beispiel primär verschweißter akkretionärer Lapilli bekannt. Van der Waals'sche Kräfte sind extrem reichweitenabhängig (Schubert, 1979; Schmoll, pers. Mitt.). Die Oberflächenrauigkeit vulkanischer Aschenpartikel läßt sie bereits wirkungslos werden, weil in den natürlichen Systemen wirkungssteigernde, maschinelle Anpreßdrücke fehlen, um den notwendigen, engen Partikelkontakt auch durch Kontaktflächenverformung herzustellen (Schmoll, pers. Mitt.). Entscheidende Bedeutung für die Aggregatbildung vulkanischer Aschen haben demnach (a) Fluidbrückenkräfte und (b) elektrostatische Anziehung.

Tabelle 5-1: Bindemechanismen und Art der Haftkräfte zur Agglomeration kohäsionsloser Partikel.

Table 5-1: Binding mechanisms between particles.

<u>H a f t m e c h a n i s m e n</u>			
Mit Materialbrücke		Ohne Materialbrücke	
<u>Festkörperbrücken</u>		<u>Anziehungskräfte zw. Partikeln</u>	
Sintern o. Verschweißen	Rekristallisation; Zementation	Van der Waals' Anziehung	Elektrostatische Anziehung
<u>Fluidbrücken</u>		<u>Formschlüssige Bindung</u>	
Adhäsion, Kohäsion in Sorptionsschichten	Kapillarkräfte Oberflächenspannung		

5.1.1 Fluidbrückenkräfte

Adsorptionsschichten

Adsorptionsschichten, die durch Kapillarkondensation auf Partikeloberflächen entstanden sind, können als nicht freibewegliche Fluidschichten bezeichnet werden (Rumpf, 1958b; Schütz & Schubert, 1980). Bei gegenseitiger Durchdringung der Fluidschichten übertragen solche Sorptionsfilme molekulare Kohäsionskräfte, die einen Zusammenhalt agglomerierter Partikel bewirken.

Kapillare Haftkräfte

Kapillare Haftkräfte werden von freibeweglichen Fluidbrücken zwischen Partikeln übertragen. Ihre Stärke und Wirkungsweise wird vom Grad der Benetzung entscheidend beeinflusst. Zwischen den im folgenden beschriebenen Stadien der Benetzung gibt es alle Übergänge (Abb. 5-1).

Im 1. Fall des Brückenbereiches bildet sich zwischen den Partikeln ein Flüssigkeitsmeniskus aus. An der Grenzlinie Fest - Flüssig - Gas wirkt der Zug der Oberflächenspannung in Richtung der Fluidbrücke (Rumpf, 1958a; Schubert, 1973; Menold, 1986). Diese Oberflächenspannung und der im Brückeninneren wirkende kapillare Unterdruck bewirken eine Anziehungskraft zwischen den Partikeln.

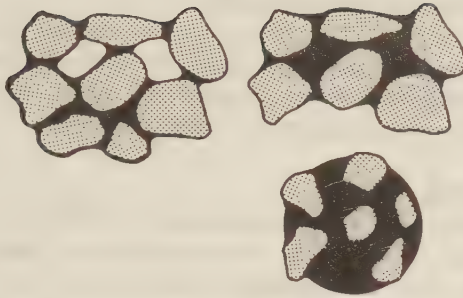


Abb. 5-1: Partikelaggregat bei unterschiedlicher Benetzung mit Fluidbindemittel. Zwischen den Stadien *Brückenbereiche* (links oben) und *Tropfen* gibt es alle Übergänge. Kapillare Haftkräfte nehmen in dieser Reihenfolge ab.

Fig. 5-1: Particle binding under different conditions of filled pore space. In the first stage of low fluid volume, fluid bridges develop between particles providing strong capillary forces. With increasing fluid volume the stage of filled pore space is reached. In the case of a concave fluid surface, capillary forces only act along the circumference of the aggregate. Under fluid excess conditions, only the surface tension of the droplet provides binding for the solids. Within the droplet particles are free to move.

Im 2. Fall des flüssigkeitserfüllten Bereiches ist sämtlicher Porenraum im Aggregat von Flüssigkeit erfüllt. Die Grenzflächenkräfte, die eine Haftkraft übertragen, wirken nur an der Oberfläche des Aggregats. Für den Fall, daß die Flüssigkeit eine konkave Oberfläche bildet, entsteht im Flüssigkeitsraum ein kapillarer Unterdruck, der dem Aggregat eine gewisse Zugfestigkeit verleiht.

Im 3. Fall (Flüssigkeitsüberschuß) umhüllt die Flüssigkeit den Feststoff vollständig: D.h. an Stelle konkaver Porenraumfüllung tritt die konvexe Oberfläche eines Tropfens. Der jetzt im Inneren herrschende geringe kapillare Überdruck bewirkt, daß zwischen den Partikeln keine Kapillarkräfte mehr wirken (Rumpf, 1958a). Der Zusammenhalt des Aggregats ist nur durch die Oberflächenspannung des Tropfens gewährleistet. Im Inneren des Tropfens sind die Partikel je nach Grad des Flüssigkeitsüberschusses frei gegeneinander beweglich (Schmoll, pers.Mitt.). Eine Zugfestigkeit des Aggregates wird erst wieder während der Entfeuchtung - Trocknung oder weitere Partikelanlagerung - erreicht.

5.1.2 Elektrostatische Anziehung

Partikel mit gegenpoliger Ladung ziehen sich an. Die Ladungen entstehen entweder beim Partikelkontakt durch Elektronenübertritt (Kontaktpotential), oder sie können bereits vor dem Kontakt eine Überschußladung tragen (Rumpf, 1974; Schubert, 1979).

Kontaktpotential

Beim Kontakt zweier Partikel unterschiedlichen Materials oder gleichen Materials verschiedener Temperatur kann durch Elektronenübertritt eine Ladungstrennung auf der Partikeloberfläche erfolgen = elektrostatische Aufladung durch das Kontaktpotential. Bei elektrischen Leitern ist die dadurch bewirkte Anziehungskraft größer als bei Nichtleitern (Rumpf, 1974).

Überschußladungen

Auf Partikeln können Überschußladungen durch Reibungselektrizität aufgrund des Kontaktpotentials erzeugt werden, wenn die Stoßpartner sofort wieder getrennt werden; sie können durch Fragmentierung entstehen (spothafte Ladungsverteilung), oder sie stammen von adsorbierten Elektronen/Ionen (Rumpf, 1974; Schubert, 1979; Simm, pers.Mitt.). Der Maximalwert der Überschußladung beträgt $100 \text{ e}^-/\mu\text{m}^2$.

Bei konstanter Ladungsdichte steigt die Anziehungskraft quadratisch mit dem Partikelradius, so daß in trockenen Systemen bei Partikeln $> 100 \text{ nm}$ maßgebliche Haftkräfte auftreten können. Elektrostatische Anziehung wirkt bei Nichtleitern insofern abstandsunabhängig, als Partikelrauigkeiten die Haftkraft kaum beeinflussen. Zwischen den Haftpartnern erfolgt jedoch allmählicher Ladungsausgleich, so daß die Anziehungskraft stetig gemindert wird. Nach überschlägiger Rechnung hat die Anziehungskraft zwischen Glaspartikeln (Nichtleiter mit hohem spezifischen Widerstand von $> 10^{13} \Omega$) unter der Bedingung maximaler Flächenladungsdichte bei gleichmäßiger Ladungsverteilung, lufttrocken nach 5 - 6 Minuten auf die Hälfte des ursprünglichen Wertes abgenommen (Simm, pers.Mitt.). Längerfristige Partikelhaftung ist durch die Elektrostatik also nicht zu erwarten.

5.1.3 Diskussion der Haftkräfte

Verfahrensingenieure haben eine Reihe von Diagrammen ausgearbeitet, die Stärke und Wirkungsweise kapillarer Haftkräfte in Abhängigkeit verschiedener Parameter wie Partikelgröße, Partikelabstand, Partikelrauigkeit oder Volumen der Fluidbrücke darstellen (Abb. 5-2). Generell erhält man die größten Haftkräfte für Flüssigkeitsbrücken bei vollständiger Benetzung der Einzelpartikel (Rumpf, 1974; Schubert, 1979).

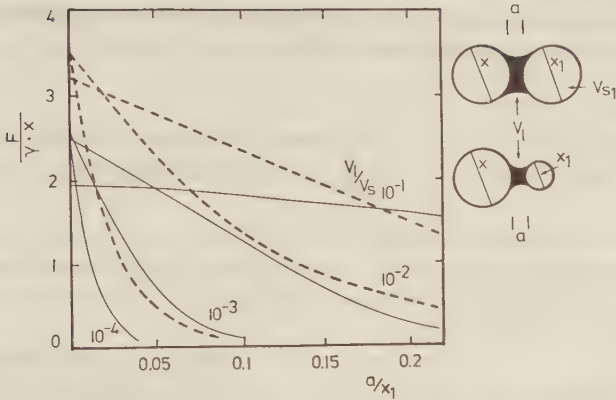


Abb. 5-2: Kapillare Haftkräfte von Fluidbrücken sind von der Korngröße, vom Brückenvolumen V_1 und vom Partikelabstand a abhängig (umgezeichnet nach Rumpf, 1974 und Schubert, 1979). Ordinate: Bezogene Haftkraft F (Grenzflächenspannung des Fluids γ * Partikelgröße); Abszisse: Partikelabstand a /Partikelgröße x .

Fig. 5-2: Capillary forces of fluid bridges depend on fluid volume V_1 and particle spacing a . Capillary forces are lower in the case of equal-sized balls than in the case of balls of different sizes ($x_1 = 1/2 x_2$) because the relative fluid volume increases with respect to the volume of the smaller ball (after Rumpf, 1974 and Schubert, 1979). Y-axis: binding force F (surface tension γ * particle size); X-axis: ratio of particle spacing a to particle size x (a/x).

Modellbeispiele: Die Haftkraft steigt zwischen zwei gleichgroßen Kugeln an, wenn das Volumen der Fluidbrücke zunimmt. Nach einer groben Abschätzung von Schmoll (pers.Mitt.) agglomeriert Wasser als Brückenflüssigkeit Partikel bis max. 0.2 mm untereinander; bei größeren Partikeln übersteigt deren Eigengewicht die Haftkräfte. Ist eine der beiden Kugeln kleiner als die andere, steigt die Haftkraft zwischen den Partikeln ebenfalls an, da das Brückenvolumen im Verhältnis zur kleineren Kugel sprunghaft angestiegen ist. Ein Anstieg der Haftkräfte erfolgt auch dann, wenn die Partikel keine idealen Kugeln sind (Schubert, 1979). Im Modellsystem Kugel gegen Platte ist die Haftkraft stärker als zwischen zwei Kugeln. Dies Modellsystem kann auf die Haftung sehr kleiner an großen Partikeln angewendet werden, wie generell die Modelle der Haftung unterschiedlich großer Partikel entscheidende Bedeutung für das Verständnis der Bildung akkretionärer Lapilli haben.

Die Haftkraft reagiert empfindlich auf Abstandsänderungen, weil die Fluidbrücke dabei gedehnt wird (Abb. 5-2). Bei sehr kleinen Brücken kann das problematisch werden, wenn zusätzlich

Oberflächenrauigkeiten den Partikelabstand vergrößern. Die Fluidbrücke zwischen den Partikeln kann reißen, so daß nur noch die Brücke zwischen der Rauigkeit selbst und dem anderen Haftpartner wirksam ist (Schubert, 1979).

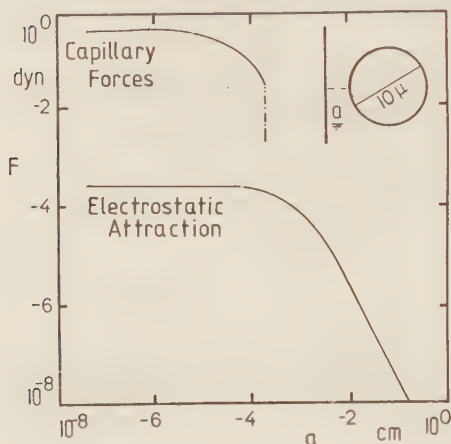


Abb. 5-3: Im Modellsystem Kugel gegen Platte wird elektrostatische Anziehung bei spothaft verteilter Ladung mit der Kraft von Fluidbrücken bei mittlerer Benetzung verglichen (Haftkraft in dyn; nach Rumpf, 1974).

Fig. 5-3: Binding forces (in dynes) as a function of particle spacing between a ball and a plate. The force of electrostatic attraction of spot-like charges on the ball is compared to capillary forces. The absolute value of the fluid bridge exceeds electrostatic forces by several orders of magnitude. On the other hand, electrostatic attraction is effective beyond the distance where a fluid bridge would break (after Rumpf, 1974).

Sehr kleine Fluidbrücken können durch Kapillarkondensation entstehen, die nach Schütz & Schubert (1980) bereits bei 40 % rel. Luftfeuchte in engen Poren einsetzen kann. Besonders begünstigt ist Kapillarkondensation durch starke elektrostatische Felder: In Elektrofiltern (s.Kap. 5.2.2) kondensiert Wasser mit gelöstem SO_2 bei 1 atm bereits bei Temperaturen von 110 - 130⁰ C (Mayer-Schwinning & Rennhack, 1980; Gebhard, pers.Mitt.). Für sehr feinkörnige Partikel < 5 μm der äußeren Rinde akkretionärer Lapilli können solche Adsorptionsfilme molekulare Kohäsionskräfte wirksam werden lassen (Rumpf, 1958; Menold, 1986).

Elektrostatische Kräfte haben für dauerhafte Partikelhaftung nur geringe Bedeutung, da sich Überschußladungen ausgleichen. Der Vergleich mit Fluidbrücken zeigt, daß Kapillarkräfte bis zum Partikelabstand von 2.5 μm um Zehnerpotenzen stärker sind, dann aber abreißen (Abb. 5-3). Fluidbrückenkräfte sind zwar starke Haftkräfte, wenn der Partikelkontakt einmal hergestellt ist, sie sind aber für die Anlagerung, d.h. das Einfangen von Partikeln über eine größere Distanz bedeutungslos. Darin liegt die überragende Bedeutung der elektrostatischen Anziehung: Partikel

werden über größere Distanz angelagert, wenn die Sinkgeschwindigkeit der Partikel nicht zu groß ist (Schubert, 1979; Hoffmann, Simm, pers.Mitt.). Im Augenblick des Partikelkontaktes müssen aber andere Haftkräfte, etwa Fluidbrücken, wirksam werden.

5.2 Technische Granulationsverfahren

5.2.1 Feuchtagglomeration

In den klassischen Verfahren der kontinuierlichen Aufbaugranulation im Granulierteller oder der Granuliertrommel werden aus kohäsionslosen, feinkörnigen Einzelpartikeln durch Zugabe fluider Bindemittel kugelige, z.T. konzentrische Aggregate aufgebaut.

Rollgranulation

Bei der Rollgranulation wird das lockere Ausgangsmaterial in eine rotierende Trommel oder auf einen rotierenden Teller aufgegeben und mit Bindemittelflüssigkeit besprüht. Durch die Rotationsbewegung rollen sich bildende Aggregate auf der Partikelschüttung des Ausgangsmaterials ab und erhalten Kugelform (Rumpf, 1958b; Herrmann; Schubert, 1979).

Die technische Aufbaugranulation geht i.d.R. nicht vom Pulver allein aus, sondern verwendet älteres Produkt als Granulationskeime, an denen feinkörnige Partikel angelagern werden (Hoffmann, Schermuly, Schmoll, pers.Mitt.). Durch gezielte Regelung der Fluidbindemittelmenge wird der Aggregatbildungsprozeß so gesteuert, daß diese Keime fast ausschließlich Feinkorn der Pulveraufgabe anlagern. Die Haftkräfte sind innerhalb gewisser Grenzen so regelbar, daß nur ein bestimmter Korngrößenbereich des Ausgangsmaterials angelagert wird. Bei größeren Partikeln überwiegen die trennenden Kräfte durch die Rollbewegung die adhäsiven Kräfte des Fluidfilms. Empirisch ermittelte Feuchtigkeitsgehalte zur Rollgranulation von Kunstdünger reichen je nach Korngrößenspektrum des Ausgangsmaterials von 15 bis 20 % fluider Phase. Unter 10% Bindemittel ist keine Aggregatbildung möglich, da die Fluidbrücken zu klein und die Haftkräfte daher zu schwach sind; oberhalb 20% + wenige % Toleranz kann ebenfalls nicht agglomeriert werden, da Bindemittelüberschuß herrscht, der das Ausgangsmaterial liquidisiert (Schermuly; Schmoll, pers.Mitt.). Bei der Rollgranulation entstehen dichte Aggregate, da sich durch die Rollbewegung feinkörnige Partikel in die Zwickel zwischen größere Körner eindrücken können (Schmoll, pers. Mitt.).

Fluidbettgranulation

Aufbaugranulation im fluidisierten Partikelgemisch ist ebenfalls eine Feuchtagglomeration. Im Gegensatz zur Rollgranulation, bei der sich die Partikel berühren, muß hier der Kontakt erst hergestellt werden (Schubert, 1979). Wenn befeuchtete Partikel durch Stoßkontakt aufeinandertreffen, bilden sich zunächst lockere Aggregate. Später verdichten sie sich durch vielfaches Anstoßen allmählich (Rumpf, 1958b). Generell sind die Aggregate aber lockerer

aufgebaut als die einer Rollgranulation, da die Partikel so aneinanderhaften, wie sie auftreten (Schmoll, pers.Mitt.). Eine Rotation in dichtere Packung unterbleibt, da keine Rollbewegung stattfindet und zwei Partikel auch im punktförmigen Kontakt zueinander schnell durch weitere Partikel gestützt werden.

Aggregate aus der Fluidbettgranulation werden bis 5 mm groß, da kaum mit höheren Gasstromgeschwindigkeiten gearbeitet wird, um größere Aggregate zur weiteren Anlagerung lange genug in der Schwebe zu halten (Herrmann, 1979). In Tellern und Trommeln erzeugte Aggregate erreichen Durchmesser bis zu 20 mm.

5.2.2 Elektrostatische Partikelanlagerung

Partikelanlagerung mittels elektrostatischer Anziehungskräfte wird in der Technik häufig angewendet. Sie werden z.B. gezielt zur Salzmineraltrennung, zur Rauchgasentstaubung und zur Trockenpulverlackierung eingesetzt.

Salzmineraltrennung

Im freien Fall durch ein elektrostatisches Feld werden zuvor durch Reibungselektrizität unterschiedlich aufgeladene Salzmineralkörner getrennt, da sich geladene Partikel den gegenpoligen Elektroden annähern (Bock, 1981). Ein technisch unerwünschter, für die vulkanologische Anwendung aber wichtiger Nebeneffekt ist die Abscheidung bis zu 100 µm großer Mineralkörner an den Elektroden.

Rauchgasentstaubung

Den Effekt der Anlagerung geladener Partikel an die gegenpolige Elektrode nutzt die elektrische Rauchgasentstaubung gezielt (Löffler, 1976; Mayer-Schwinning & Rennhack, 1980; Reh, 1982). Das Rauchgas passiert im Elektrofilter Elektrodengassen, zwischen denen zur Wirkungssteigerung zusätzlich Sprühelektroden angebracht sind. Die durch die Corona-Entladung der Sprühelektroden ionisierten Stäube wandern zu den Abscheideelektroden und lagern sich dort an. Mit elektrischen Filtern können Partikel bis 100 µm Korngröße aus dem Rauchgas abgeschieden werden.

Pulverlackierung

Die elektrostatische Pulverlackierung arbeitet nach einem ähnlichen Prinzip: Das Pulver passiert in der Beschichtungspistole Elektroden, die es aufladen. Das ionisierte Farbpulver wandert zu einem gegenpolig geladenen oder einem geerdeten Werkstück und lagert sich dort an (folgendes Kapitel).

Unter Einwirkung starker elektrostatischer Felder in der Größenordnung von 4 - 5 kV/cm und Spannungen von 100 - 125 kV ist technisch eine Korngröße bis 100 μm abscheidbar. In diesem Korngrößenbereich (< 125 μm) liegt auch die Verteilung der feinkörnigen Rinde akkretionärer Lapilli, für deren Bildung ich elektrostatische Partikelanlagerung postuliere.

5.3 Experimente zum elektrostatischen Verhalten vulkanischer Asche

Die im folgenden beschriebenen Experimente wurden mit dem Ziel durchgeführt, festzustellen, ob (a) mittels elektrostatischer Anziehung Vulkanasche über eine bestimmte Distanz hinweg an einer Metallplatte angelagert werden kann und (b) ob der Korngrößensprung zwischen Kern und Rinde sowie deren interne Gradierung mit elektrostatischer Partikelanlagerung erklärt werden kann: Es läßt sich u.U. experimentell eine Selektion gegenüber der Ausgangskornverteilung nachweisen, die Korngrößensprung und Gradierung erklären.

Voraussetzung

Arbeitsweise des Gerätes

Das verwendete Pulverbeschichtungsgerät besteht aus einem Steuerteil mit Vorratsbehälter zur Regelung der Stromversorgung und der Pulverfluidisierung, sowie der Beschichtungspistole mit eingebautem Hochspannungstransformator und den Elektroden. Im Vorratsbehälter wird das Pulver mit Druckluft fluidisiert, pneumatisch durch einen Schlauch zur Pistole transportiert und dort ausgestoßen. In der Pistolenmündung sitzen vier Hochspannungselektroden zur Aufladung der Partikel. Die angelegte Spannung beträgt bis zu 100 kV mit 0.07 - 0.15 mA Stromstärke. Das Pulver lagert sich aufgrund der negativen Ladung der Partikel am geerdeten Werkstück an.

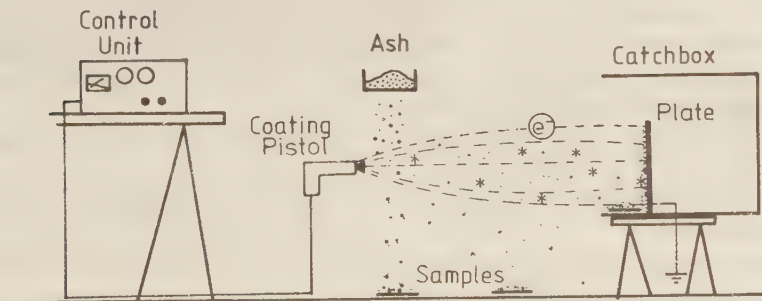


Abb. 5-4: Experimente zum Verhalten vulkanischer Asche in elektrostatischen Feldern: Ionisierte Aschenpartikel werden entlang der Feldlinien in Richtung auf eine Metallplatte abgelenkt und teilweise dort angelagert (Sternchen symbolisieren ash cluster).

Fig 5-4: Experimental equipment to study the behavior of volcanic ash in electrostatic fields. The ash was distributed into the electrostatic field by a sieve to make sure that only gravity and electrostatic forces acted on the particles. Ionized ash particles migrate towards the plate. Some of the ash adhered to the plate, whereas another part settled to the ground before reaching the plate. Asterisks symbolize ash clusters. The artificial fallout was sampled along the drift path for grain-size analysis.

Versuchsanordnung

Das Ausgangsmaterial bildete Asche < 0.25 mm Korngröße eines Ignimbrites der MLST. Die gewählte Korngröße entspricht etwa der Kornobergrenze in R(Fall)-Lapilli.

Die Beschichtungsversuche wurden gegen eine Aluminiumplatte von 30-35 cm im Quadrat ausgeführt. Die Platte wurde in einem 80 x 80 cm großen Karton, der als Auffang vorbeistreichender Asche diente, senkrecht aufgestellt und über das Erdungskabel mit dem Gerät verbunden (Abb 5-4).

- Die Entfernung Pistole - Platte beträgt 50-60 cm;
- die Platte steht 45-50 cm über dem Boden;
- die Pistole zielt in 60 cm Höhe auf die Plattenmitte;
- die Fallhöhe der Asche beträgt 20 cm bis zum Eintritt ins Feld, = 80 cm bis zum Boden.

Um möglichst unter naturnahen Versuchsbedingungen zu arbeiten und um eine Vorsortierung der Kornverteilung durch die Fluidisierung im Vorratsbehälter auszuschließen, wurde auf pneumatischen Transport der Asche verzichtet. Die Aschenpartikel wurden aus einem Sieb in das Feld zwischen Pistole und Platte eingestreut, sie unterlagen so nur der Fallbeschleunigung und der Ablenkung des elektrostatischen Feldes - d.h. die Anlagerung der Asche an der Platte wird nur von der Elektrostatik geleistet.

Die Versuche

Es wurden eine Reihe von Versuchen mit verschiedenen Spannungen und Korngrößenverteilungen sowie unterschiedlicher Beschichtungszeit ausgeführt:

- Kurzzeitbeschichtungen mit vollem Kornspektrum < 0.25 mm bei 25, 50 und 70 kV Spannung;
- längere Beschichtung mit vollem Kornspektrum bei 50 kV;
- Kurzzeitversuche mit 1/2 Phi Kornspektrern bei 50 kV, aber nur über 30 cm Entfernung zur Platte.

(Kurzzeitversuche laufen nur so lange, bis eine analysierbare Aschenmenge an der Platte angelagert ist)

Zur Auswertung wurde die Korngrößenverteilung der Asche in verschiedenen Entfernungen von der Pistole und der angelagerten Asche bestimmt.

Ergebnisse und Interpretation

Grundsätzlich ist es möglich, ionisierte Aschenpartikel über eine Distanz von 60 cm an einer Metallplatte anzulagern. Die Anlagerung geschieht so, daß sich zunächst einzelne Aggregate auf der Platte anlagern, die bei weiterer Beschichtung einen geschlossenen Belag bilden (Abb. 5-5). Die Korngrößenverteilung der angelagerten Asche ist von der verwendeten Spannung und von der Entfernung zur Platte abhängig, nicht von der Beschichtungsdauer:

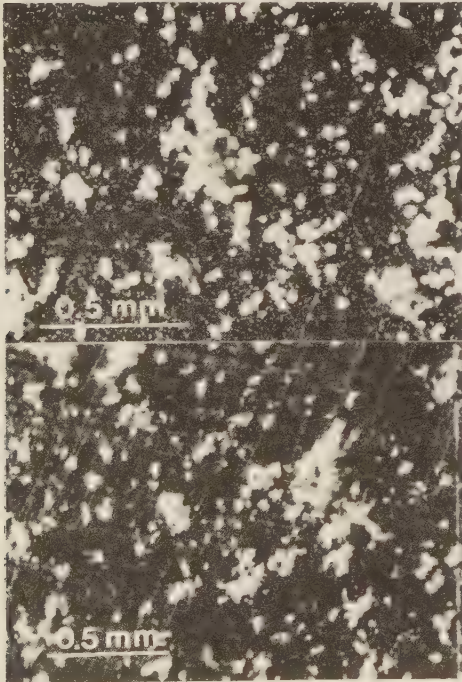


Abb. 5-5: Künstlich erzeugte Aschenaggregate: (a) Experiment mit Asche 30 - 63 μm Korngröße. Wahrscheinlich sind die Partikel, die an der Platte haften, < 45 μm groß. (b) Experiment mit Kornspektrum < 250 μm . Die Asche lagert sich als kleine Aggregate, den ash clustern, an der Platte an.

Fig. 5-5: Artificial ash clusters: (a) Experiment using ash 30 - 63 μm in grain-size. Particles adhering to the plate seem very uniform in size, probably < 45 μm . (b) Experiment using the grain-size range < 250 μm . Ash forms artificial clusters adhering to the plate. The maximum grain-size is 180 μm , but the bulk of ash is < 45 μm in size, indicating that the weak electrostatic attraction can accrete the fine ash but not the larger grains. The small amounts of larger grains are thought to be entrained into the clusters by the quick agglomeration of the fines. One can call the size fractions < 45 μm the cluster forming ash.

- Partikel > 0.177 mm werden nicht angelagert, da ihre Sinkgeschwindigkeit zu groß ist.
- Bei kleinsten Korngrößenintervallen von 1/2 Φ gelangen selbst bei 30 cm Entfernung nur Partikel < 90 μm Korngröße zur Platte, aber erst Körner < 63 μm , wahrscheinlich nur < 45 μm haften aufgrund ihres Verhältnisses Partikelgewicht/Anziehungskraft an der Platte; es bilden sich

ebenfalls kleine Aggregate. Da in den Versuchen mit vollem Kornspektrum Partikel $> 125 \mu\text{m}$ angelagert werden, ergeben sich zwei Schlußfolgerungen:

- (1) Die elektrostatische Anziehungskraft reicht nicht aus, Einzelkörner $> 45 \mu\text{m}$ haften zu lassen. Ein Anhaften ist nur im Verbund mit einem feinkörnigen Anteil möglich, der ein Stützgerüst um die grobkörnigen Partikel bildet, das die Haftkraft verstärkt.
- (2) Selbst bei reduzierter Entfernung gelangen grobe Einzelkörner $> 90 \mu\text{m}$ infolge hoher Sinkgeschwindigkeit nicht bis zur Platte. Wenn aber bei vollem Kornspektrum Anlagerung über die doppelte Entfernung möglich ist, muß die Sinkgeschwindigkeit der groben Körner reduziert sein. Das ist nur dadurch zu erklären, daß sich Aggregate bilden, die die Sinkgeschwindigkeit der groben Körner durch Erhöhung des Luftwiderstandes reduzieren (Sorem, 1982; Carey & Sigurdsson, 1982). Aus der Luft aufgefangene Asche läßt in der Tat kleine Aschenaggregate mit Kanten : Flächen - Kontakten der Partikel erkennen.

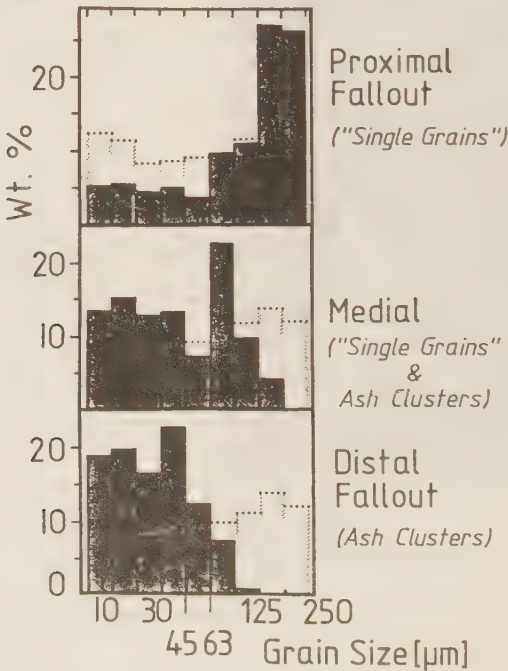


Abb. 5-6: Kornverteilung künstlich in Experiment erzeugter Falloutasche.

Fig. 5-6: Grain-size distribution of experimental fallout ash. Ash deposited below the sieve (lag fall) is coarse grained, unimodal, and fines depleted, but shows a fine tail on the distribution curve. The medial ash is bimodal in size distribution. The distribution minimum at 45 μm corresponds to the grain-size boundary that separates the cluster-forming ash-size from the coarse grains (that are either entrained into the clusters or that settle as simple grains forming the proximal, coarse-grained ash fall). Primary ash-size distribution used in the experiments is shown as background.

Die Korngrößenverteilung des künstlichen Aschensedimentes am Boden ist unmittelbar unterhalb des Siebes grobkörnig, unimodal, aber mit einem feinkörnigen Schwanz: Proximaler lag fall - das ist ein grobkörniges Sediment, in dem Feinkorn stark abgereichert ist (Abb. 5-6). In 30 cm Entfernung vom Einstreupunkt (mediale Asche) ist die Kornverteilung bimodal. Das Verteilungsminimum bei 45 - 63 μm markiert die Grenze, die denjenigen Korngrößenbereich, der auch als Einzelkorn an der Platte angelagert werden kann ($< 45 \mu\text{m}$), vom Korngrößenbereich trennt, der als Einzelkorn nicht haftet ($> 63 \mu\text{m}$). Die Asche, die an der Platte angelagert wurde, zeigt unimodale Kornverteilung. Der überwiegende Teil der Asche hat $< 45 \mu\text{m}$ Korngröße; das Spektrum entspricht etwa dem feinkörnigen Teil medialer Asche. Da sich die Asche in Form kleiner Aggregate an der Platte anlagert, entspricht das Spektrum etwa der Kornverteilung in ash clustern.

Im elektrostatischen Feld, das zwischen Pistole und Platte aufgebaut wird, trennen sich Partikel mit hoher Sinkgeschwindigkeit von den Partikeln und Aggregaten mit niedriger Sinkgeschwindigkeit, die in größerer Entfernung sedimentieren bzw. an der Platte angelagert werden.

In der Asche 30 - 63 μm Korngröße sind dichte Komponenten gegenüber der Ausgangsverteilung ähnlich angereichert wie in den Rinden der R(Fall)-Lapilli. Das läßt sich so erklären: Im Schüttelsieb laden sich Kristalle, Fremdgestein und Glas während des Einstreuens unterschiedlich gegeneinander auf. Wenn sich nach Eintritt in das Feld um feinkörnige Kristalle bevorzugt Aggregate aufbauen, werden sie daher mit größerer Häufigkeit an der Platte angelagert als es ihrer Ausgangsverteilung entspricht - Aggregatbildung kompensiert höhere Sinkgeschwindigkeit der Kristalle gegenüber Glaspartikeln. Eine Anreicherung der Kristalle gegenüber der Ausgangsverteilung wird evtl. auch dadurch verstärkt, daß sich feinkörnige Glaspartikel bevorzugt an den grobkörnigen Partikeln des lag fall anlagern und infolge der hohen Sinkgeschwindigkeit des Groben vorzeitig sedimentiert werden. Dadurch verarmt die Restasche an diesen Komponenten.

6. Genese akkretionärer Lapilli der Laacher See Tephra

6.1 Grundlagen der Aggregatbildung in vulkaniklastischen Systemen

6.1.1 Feuchtigkeit aus kondensiertem Wasserdampf

Wasserdampf ist die Hauptkomponente der bei explosiven Vulkaneruptionen in die Atmosphäre injizierten Gase: Rose et al. (1982) schätzten die während der Ausbrüche des Mount St. Helens (18. Mai 1980 und Folgeeruptionen) eruptierte Menge Wasser auf 4×10^{14} g. Während der Abkühlung der Eruptionswolken kondensiert der Wasserdampf auf feinkörnigen Aschenpartikeln, wie in Experimenten in der Nebelkammer nachgewiesen wurde (Cheng, 1982). Partikel um 1 μm Korngröße sind hochgradig hygroskopisch und fungieren als Kondensationskeime.

In turbulenten Aschenwolken können Aschenpartikel, die durch kondensierten Wasserdampf feucht wurden, bei gegenseitigem Stoßkontakt zu Aggregaten agglomeriert werden. Kapillarkondensation in engen Poren der Aggregate verstärkt den Zusammenhalt der Partikel durch Erhöhung des Fluidbrückenvolumens. Tomita et al. (1985) fanden in akkretionären Lapilli des Sakurajima Vulkans Hinweise darauf, daß (1) Feuchtigkeit auf feinkörnigen Tephrapartikeln und (2) vermehrte Kondensation im Porenraum sich bildender Aggregate wichtige Mechanismen der Aggregatbildung sind: In akkretionären Lapilli bildeten sich Gipskristalle, die in der Aschenmatrix fehlen, solange diese nicht nach der Ablagerung feucht wurde. Die Gipsbildung wird durch die Reaktion von Feuchtigkeit mit an den Partikeln haftenden Sulfiden erklärt. Die bevorzugte Gipsbildung in akkretionären Lapilli bedeutet, daß die Aggregate stärker befeuchtet waren als die Asche der Matrix. Es gibt demnach während der Aggregatbildung in natürlichen Systemen einen Prozeß, der Wasserdampfkondensation in engem Porenraum verstärkt: Ich nehme an, daß es elektrostatische Felder sind, die in Eruptionswolken Kapillarkondensation verstärken (Schütz und Schubert, 1980).

Für das Verständnis der Haftkraftverteilung während der Bildung akkretionärer Lapilli ist die Kenntnis der Korngrößenverteilung der agglomerierten Asche wichtig. Akkretionäre Lapilli aus Ignimbriten der MLST binden ein Korngrößenspektrum von ca. 5 Gew.% > 125 μm , 17 Gew.% 125 - 63 μm und 78 Gew.% < 63 μm . Bei einer Kornverteilung mit nur 22 Gew.% > 63 μm erscheint es wenig wahrscheinlich, daß gleichgroße, grobkörnige Partikel direkt aneinandergelagert werden, sondern feinkörnige Aschenpartikel < 63 μm Brücken zwischen größeren Partikeln bilden. Die Gefügeuntersuchungen mit dem Rasterelektronenmikroskop bestätigen das. Für die Bildung akkretionärer Lapilli müssen die Haftkräfte also nur so stark sein, um Feinkorn an grobe Partikel und Feinkorn untereinander zu agglomerieren. Den technischen Modellsystemen der Haftung verschiedengroßer Kugeln und dem Modell Kugel gegen Platte kommt mithin größere Bedeutung zu als den Modellen gleichgroßer Kugeln, für welche im Verhältnis zum Partikelgewicht geringere Haftkräfte realisiert sind.

6.1.2 Elektrostatische Felder bei explosiven Eruptionen

Bei explosiven Vulkaneruptionen sind elektrische Entladungen in der Eruptionssäule häufig beobachtet worden (Hatakeyawa & Uchihawa, 1950; Anderson et al., 1965; Shepherd et al., 1979; Cobb, 1980; Kikuchi & Endo, 1982; Hobbs & Lyons, 1983). Durch die Injektion vulkanischer Aschen in die Atmosphäre werden also abnorme, d.h. vom normalen elektrostatischen Feld der Atmosphäre abweichende Felder aufgebaut, von denen nach der Diskussion elektrostatischer Anziehungskräfte ein wichtiger Beitrag zur Aggregatbildung zu erwarten ist, da sich die Stoßwahrscheinlichkeit der Aschenpartikel untereinander erhöht (Paluch, 1970). Obwohl die elektrischen Spannungen bis zur Blitzentladung reichen, scheinen die Feldstärken lateral schnell abzunehmen: Kikuchi & Endo (1982) maßen 5 km vom Mount Usu (Japan) entfernt 15 kV/m; während der Mount St. Helens Eruption 1980 wurden 20 kV/m (Cobb, 1980), vom Flugzeug aus bis 50 km Entfernung 3.5 kV/m und Spitzenwerte von 10 kV/m mit entgegengesetzter Feldrichtung in 175 km Entfernung gemessen (Hobbs & Lyons, 1983). Die Autoren konnten zeigen, daß Feldstärken und Ladungsverteilungen direkt an Tephra-Fallout unterschiedlicher Korngrößenverteilung gebunden sind, doch ist die Ladung auf den Aschenpartikeln nach Hatakeyawa & Uchikawa (1950) mit 0.108 - 0.027 esu/g gering (esu = electrostatic unit; das Maß der elektrostatischen Ladung, die mit der Kraft 1 dyn eine gleiche Ladung im Vacuum 1 cm bewegt).

Während eines Ausbruches werden starke Schwankungen des Feldes bis zur Umpolung beobachtet. Das zeugt zum einen von der Inhomogenität dieser Felder, andererseits werden die Schwankungen auf die zahlreichen Entladungen zurückgeführt (Hobbs & Lyons, 1983). Kikuchi & Endo (1982) zeigten auch, daß sich durch Reibungselektrizität wiederaufgewirbelter Asche ein ziemlich stabiles, gleichmäßiges Feld aufbaut. Demnach müssen frische Tephrapartikel eine über das Maß der Reibungselektrizität hinausgehende Überschußladung tragen, die nach Cheng (1982) in frischer Tephra durch Fragmentierung entsteht. Vor der Fragmentierung erfolgt in der Schmelze während der Blasenbildung eine Ladungstrennung aufgrund thermoelektrischer Effekte, die durch den Temperaturunterschied außen/innen im Blasensteg auftreten. Der Bruch des Blasensteges trennt die Ladungen auf zwei verschiedene Partikel.

Nach Simm (pers.Mitt.) entsteht durch Fragmentierung spothaft verteilte Ladung unterschiedlichen(?) Vorzeichens auf einem Partikel. Derartige Partikel wirken nur durch eine Netto-Überschußladung auf ihre Umgebung. Darin können u.U. die geringen Ladungskonzentrationen begründet sein, die an vulkanischer Asche gemessen wurden.

6.1.3 Zusammenfassung

Die Diskussion der Haftkräfte hat gezeigt, daß Fluidbrückenkräfte um ein vielfaches stärkere Haftkräfte liefern als elektrostatische Anziehung. Fluidbrücken sind aber reichweitenabhängig, da sie bei Dehnung leicht abreißen. Die Elektrostatik gewinnt daher für die Partikelanlagerung über größere Entfernung von etwa 1/2 mm entscheidende Bedeutung (Reimer, 1983b). Während explosiver Vulkaneruptionen entstehen große Mengen geladener Tephrapartikel, die ihrerseits durch Reibungselektrizität ein abnormes elektrostatisches Feld in der Atmosphäre aufbauen. In den Aschenwolken kann es durch elektrostatische Kräfte bei ausreichend geringem Partikelabstand aufgrund der Massenkonzentration oder ausreichender Partikelannäherung durch Konvektion, Winddrift oder dergleichen zu einer Aggregatbildung kommen. So beobachteten Marshall et al. (1981) experimentell in aufgewirbeltem Staub frisch gemahlener Lava eine spontane Aggregatbildung zu kugeligen, flockigen oder kettenförmigen Aggregaten. Da sich gegenpolige Überschußladungen über den Kontakt im Laufe der Zeit ausgleichen, sind für längerfristige Partikelhaftung Kapillarkräfte notwendig. Ein schon vor dem Kontakt auf den Partikeloberflächen kondensierter Feuchtigkeitfilm beeinträchtigt das elektrostatische Verhalten nicht (Simm, pers.Mitt.). Elektrostatische Felder verstärken Kapillarkondensation in engen Poren, das über eine Zunahme des Fluidbrückenvolumens zu einer weiteren Haftkraftverstärkung im Aggregat führt. Ferner hat sich gezeigt, daß für die Partikelhaftung während der Agglomeration ein hoher Prozentsatz feinkörniger Asche $< 45 \mu\text{m}$ wichtig ist. Die Stütz- und Brückenfunktion dieser feinkörnigen Asche verstärkt sowohl die Kapillarkräfte (Haftmodell verschiedengroßer Kugeln), als auch die Haftung durch elektrostatische Anziehung (Experimente zur Aschenanlagerung).

6.2 Entstehung akkretionärer Lapilli im Bodentransport

Bevor ich die Entstehung akkretionärer Lapilli im einzelnen diskutiere, sind die wichtigsten Merkmale der Aggregate aus Ignimbriten und Surges noch einmal zusammengefaßt (Tab.: 6-1). Neben einem allgemeinen Entstehungsmodell müssen vor allem die Merkmale erläutert werden: (a) Verlust der feinkörnigen Rinde; (b) bessere Sortierung der Aggregate in Surge-Ablagerungen als in Ignimbriten; (c) warum sind in Surges (auch distale!) C-Typ Lapilli grobkörniger als R-Typ Lapilli, in Ignimbriten aber nicht (zumindest weniger ausgeprägt)?

Tabelle 6-1: Gegenüberstellung der wichtigsten Merkmale akkretionärer Lapilli aus pyroklastischen Strömen und Surges.

Table 6-1: Characteristics of accretionary lapilli from pyroclastic flows and surges.

Akkretionäre Lapilli		
Aus Surges	<u>Proximale Ablagerungen</u>	Aus pyrok1. Strömen
- R- und C-Typ in versch. Schichten		Wie in Surges
- Kugelige Aggregate		Stark elliptisch geformt
- Größe 3.0/6.5 mm (rel.gut sortiert)		3.5/10 mm (rel.schlecht sortiert)
- Partikel ≥ 0.5 mm als Keim umhüllt von < 0.35 mm		Partikel generell nur um 0.35 mm
- Median 30 - 50 μ m		Median 30 - 50 μ m
- C-Typ grobkörniger als R-Typ		Kein prinz. Unterschied
<u>Distale Ablagerungen</u>		
- R-Typ verliert seine feinkörnige Rinde und geht distal in C-Typ über		
- Aggregate generell besser sortiert als proximal		
- Median etwa > 40 μ m (= etwas gröber als Proximal)		Median wie Proximal (= kein Unterschied)

Allgemeines Modell

Das allgemeine Entstehungsmodell besagt knapp formuliert folgendes:

In einer sich horizontal ausbreitenden Suspensionswolke bilden sich Aschenaggregate, wenn Partikel zusammenstoßen und die Haftkräfte größer sind als die trennenden Kräfte. Aschenwolken sind einem technischen Fluidbett ähnlich, d.h. der Partikelkontakt muß erst hergestellt werden - entweder durch Zusammenstoß im turbulenten Transport oder im Auftrieb fluidisierender Gase. Elektrostatische Kräfte unterstützen die Agglomeration, indem sie die Stoßwahrscheinlichkeit zwischen Partikeln erhöhen. Da für längerfristige Partikelhaftung nur

Fluidbrücken in Frage kommen, setzt Aggregatbildung erst dann ein, wenn eine gewisse Menge Wasserdampf kondensiert ist. Wie in der Technik können grobkörnige Partikel als Agglomerationskeime wirken und feineres Korn anlagern. Kondensation beeinflusst so über das Volumen der Fluidbrücken die Korngröße, die agglomeriert werden kann; letztlich regelt sie auch die Ausbildung des Aggregats als (feinkörniger) proximaler R-Typ, oder als (grobkörniger) distaler C-Typ. Erfolgt die Partikelanlagerung allseitig gleichmäßig, entstehen kugelige Aggregate. Erfolgt die Anlagerung ungleichmäßig, etwa dann, wenn sich die fluidbettähnliche Aggregatbildung in der Aschenwolke mit einer horizontalen Ausbreitung überlagert, so daß eine Rollkomponente bei der Agglomeration auftritt (ähnlich der technischen Rollgranulation), so werden (rotations)elliptische akkretionäre Lapilli entstehen.

Während der Anlagerung der feinkörnigen Rinde kommt es zu einer Korngrößenselektion gegenüber der Ausgangskornverteilung in der Aschenwolke. Die Selektion ist aber nur da möglich, wo die Haft- und Agglomerationskräfte gezielt eine Kornfraktion herausgreifen können: Im schlotnahen Bereich im Stadium hoher Verdünnung der Suspension. Die sprunghafte Korngrößenabnahme in der Rinde sowie die Änderung des Partikelgefüges sprechen für einen Wechsel von Feuchtagglomeration zu elektrostatischer Anlagerung. Da elektrostatische Kräfte um Größenordnungen geringer sind, werden nur noch feinkörnige Partikel angelagert, die mit den Punkten gegenpoliger Ladung aneinanderhaften. Mit zunehmender Ausbreitung der Suspensionswolke steigen Konzentration und Kondensationsgrad, wodurch die Korngrößenselektion eingeschränkt wird, da Partikel bereits zusammenzuklumpen beginnen.

6.2.1 Akkretionäre Lapilli in pyroklastischen Surges

Pyroklastische Surges sind zeitlich begrenzte, nicht-stete Strömungen eines, oder einer Serie von Explosionspulsen, deren kinetische Energie innerhalb von km vom Eruptionszentrum abklingt (Wohletz & Sheridan, 1979). Das Zwei-Phasen-Gemisch aus Gas und Feststoff hat eine zu pyroklastischen Strömen relativ niedrige Partikelkonzentration von proximal $\pm 95\%$ Gas zu distal $\pm 60\%$ Gas. Partikel werden aufgrund der Turbulenz in Schwebelage gehalten, Fluidisierung spielt keine Rolle (Fisher & Valentine, 1986; Valentine, 1987). Die schnelle Ausbreitung der Surges bewirkt ein starkes horizontales Moment, sowohl der Gaswolke, wie der Partikel in der turbulenten Suspension. Der progressive Fazieswechsel von proximalen Dünen und Schrägschichtung zu distaler, ebener Parallelschichtung ist durch abnehmende Transportkraft und Turbulenz bedingt.

In der turbulenten Wolke kommt es zur Aggregatbildung, wenn suspendierte Partikel zusammenstoßen und die Haftkräfte stärker sind als die trennenden Kräfte. Grobkörnige Partikel > 0.5 mm Korngröße wirken in der Suspension als Agglomerationskeime, die zunächst nur feinkörnigere Partikel anlagern. Die partikeldispersiven Kräfte wirken nämlich um so stärker, je größer ein Partikel ist: (a) Weil mit steigender Querschnittsfläche des großen Korns die

angreifenden Kräfte wachsen (Unterschiede in der Masse und in der Relativgeschwindigkeit eines großen und eines kleinen Korns); (b) weil mit steigendem Verhältnis Partikelvolumen zu Fluidbrückenvolumen die Haftkraft abnimmt. Außerdem muß man damit rechnen, daß kondensierte Fluidhüllen noch nicht gleichmäßig auf allen Partikeln ausgebildet sind. Wahrscheinlich sind feinkörnige Partikel stärker umhüllt, weil sie schneller abkühlen und daher früher als Kondensationskeime dienen als grobe Partikel. Das kann mit dazu beitragen, daß gröbere Partikel zu einem geringeren Prozentsatz angelagert werden, da bei ihnen die Haftkräfte infolge unzureichender Fluidhüllen noch zu schwach sind.

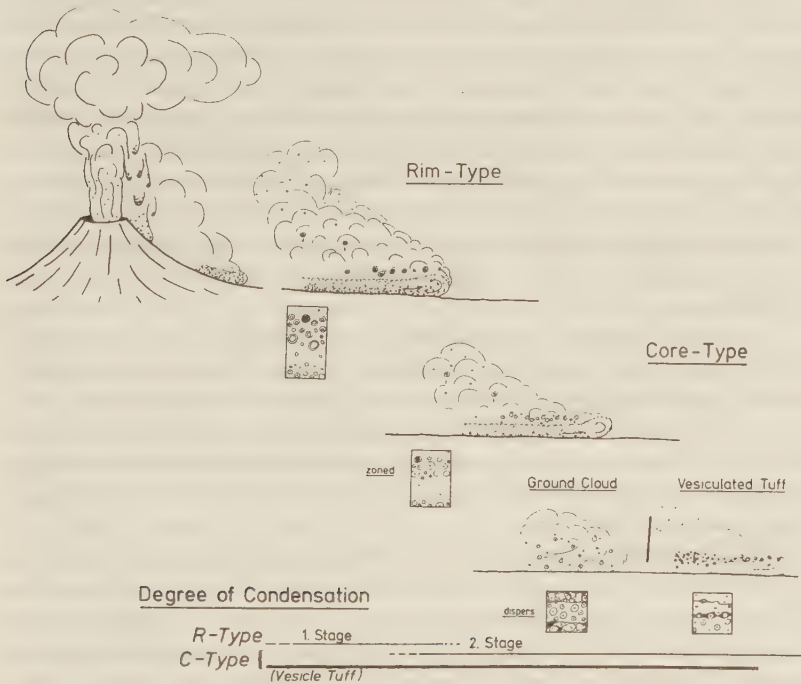


Abb. 6-1: Entstehung akkretionärer Lapilli im horizontalen Bodentransport am Beispiel eines pyroklastischen Stromes. Die Ausbildung der Aggregate als R- oder C-Type ist vom Grad der Wasserdampfkondensation abhängig.

Fig. 6-1: Accretionary lapilli formation in pyroclastic flows. Origin as well as type of aggregates depends on the degree of water vapor condensation. Accretionary lapilli form at the intersection of the lower, semi-fluidized avalanche part of the flow and the upper elutriation cloud. At the beginning of agglomeration in proximal areas condensation is low. Ash particles act as condensation nuclei, are eventually surrounded by a fluid film and stick to each other on collision contact. Electrostatic attraction between particles allows rim formation by selective accretion of fines from

the cloud. With increasing distance from source, condensation increases and causes ash clotting, thus hindering the grain-size selection necessary for rim formation. Therefore, only C-lapilli occur in distal deposits. Near the distal end flows spread either as a turbulent ground cloud or as a high particle concentration avalanche. In ground clouds accretionary lapilli form all over the suspension, so there is no zonation of aggregates in the resulting deposit. In a high particle concentration avalanche probably not only accretionary lapilli but also irregular shaped ash clots are formed.

In der Technik wird die Anlagerung feinkörniger Partikel an grobe Keime durch gezielte Zugabe von Bindemittel geregelt. In natürlichen Systemen hängt die Fluidbindemittelmenge vom Grad der Wasserdampfkondensation ab. Die Agglomeration beginnt in einem bestimmten Abkühlungsstadium, das einem Kondensationsgrad von mindestens 10 % Fluidbindemittel entspricht. Die Abkühlung entspricht einer bestimmten Zeitdauer und somit einer bestimmten Entfernung vom Eruptionszentrum. Schlotnäher sollten keine akkretionären Lapilli verbreitet sein. Zuerst bilden sich die Kerne der R-Typ Lapilli (Abb. 6-1), in denen zunächst nur Partikel < 0.35 mm um grobkörnigere Keime angelagert werden. Für größere Partikel sind die Fluidbrückenkräfte noch zu schwach. Da der Lapillus durch konzentrische Anlagerung wächst, sind kleine Lapilli relativ zu größeren grobkörniger, da bei ihnen der Keimbereich stärker ins Gewicht fällt.

In diesem proximalen Bereich hochturbulenter Ausbreitung einer Surge ist die Massenkonzentration noch relativ niedrig und die Wasserdampfkondensation hat gerade begonnen, so daß spontanes Zusammenklumpen der Asche ausgeschlossen ist. Nur unter diesen Bedingungen ist bei geeigneter Haftkraftverteilung eine Korngrößen Selektion möglich, die während der Anlagerung einer Rinde nur das Feinkörnigste agglomeriert und gröbere Körner ausschließt. Wahrscheinlich wird die Rinde durch elektrostatische Anlagerung feinkörniger Partikel < 125 µm erzeugt:

Durch Reibungselektrizität zwischen Partikeln und durch weitere Partikelfragmentierung kann in turbulenten Surges ein eigenes, elektrostatisches Feld aufgebaut werden, das die Agglomeration insgesamt fördert, da es die Stoßwahrscheinlichkeit der Partikel erhöht. Das gerade gebildete Aggregat, nämlich der Kern des späteren akkretionären Lapillus, besteht seinerseits aus geladenen Aschenpartikeln und kann so insgesamt eine Nettoüberschußladung tragen, mit der es Partikel aus der Umgebung anzieht. Mit elektrostatischer Anlagerung der feinkörnigen Rinde kann der Korngrößensprung zwischen Kern und Rinde, der Wechsel des Partikelgefüges und die interne Gradierung erklärt werden: Der Korngrößensprung ist durch die begrenzte Anziehungs- und Haftkraft bedingt, die um 10er Potenzen unterhalb derjenigen von Fluidbrücken liegt. Nach den Experimenten zu urteilen, scheinen überhaupt nur Partikel < 45 µm als Einzelkörner agglomerierbar. Größere Partikel werden nur angelagert, wenn sie zuvor in einem cluster von feineren umlagert wurden, die als Brücke das große Partikel stützen und die Haftkraft verstärken. Das kartenhausähnliche Partikelgefüge rührt daher, daß Partikel nur mit den Punkten gegenpoliger Ladung aneinanderhaften. Bildet sich die Rinde sehr schnell, kann eine

Einregelung der Partikel durch gegenseitiges Abstützen verhindert werden. Die Gradierung der Rinde kann zwei Ursachen haben, die wahrscheinlich zusammenwirken:

- (1) Durch Anlagerung der Rinde wird die Ladung des Kerns abgeschirmt und neutralisiert; völlige Neutralisierung der Anziehungskraft wird aber durch die Eigenladung der angelagerten Partikel eine gewisse Zeit hinausgezögert. Legt man konstante Ladungsdichte aller Partikel zugrunde, nimmt die Ladung und damit die Anziehungskraft mit abnehmender Korngröße ebenfalls ab. Die so verminderten Anziehungskräfte bewirken, daß nur noch zunehmend feinere Aschenpartikel angelagert werden. Das führt neben einer internen Gradierung auch zu einer konstanten Rindendicke, die unabhängig vom Durchmesser des Kerns ist.
- (2) Es ist zu erwarten, daß die Rinde spontan in sehr kurzer Zeit angelagert wird, da die Verweilzeit des Aggregats in der Suspension mit zunehmender Größe schnell abnimmt. Die Anziehungskraft des Aggregates wirkt innerhalb eines bestimmten Radius, so daß aus dem Nahbereich noch gröbere Partikel angelagert werden können, als aus größere Entfernung. Für diese schnelle Rindenbildung spricht, daß keine grobkörnigen Partikel zufällig durch Stoßkontakt agglomeriert werden. Die Erhaltung des Kartenhausgefüges spricht ebenfalls für eine schnelle Anlagerung, da die Partikel zumindest im inneren Teil nicht eingeregelt werden.

Distal gehen R-Typ Lapilli bei fortschreitender Wasserdampfkondensation durch Verlust der feinkörnigen Rinde in C-Typ Lapilli über, die solange gebildet werden, bis Wasserüberschuß oberhalb $\pm 20\%$ Bindemittel geordnete Agglomeration generell verhindert. Die anhaltende Wasserdampfkondensation läßt dickere Fluidfilme um die Partikel entstehen, wodurch mit ansteigendem Verhältnis Fluidbrückenvolumen zu Partikelvolumen die Kapillarkräfte zwischen Partikeln zunehmen (Rumpf, 1974). Gleichzeitig dämpft steigende Massenkonzentration und abnehmende Transportkraft die Turbulenz in der Surge (Valentine, 1987), das zu einer Verminderung der trennenden Kräfte für gerade agglomerierte Aschenpartikel führt. Zunahme der Haftkraft und Abnahme der Transportkraft lassen so in distalen Ablagerungen grobkörnigere C-Typ Lapilli entstehen, die einen höheren Anteil Fraktion $> 125\ \mu\text{m}$ agglomeriert haben als der R-Typ.

Bei weiter zunehmender Partikelkonzentration und weiter steigendem Kondensationsgrad besteht ein zunehmender Zwang zur Agglomeration. In feuchten Surge-Wolken ist daher die zur Bildung einer Rinde notwendige Korngrößenselektion verhindert, weil die Asche allmählich zu klumpen beginnt. In diesem distalen Ausbreitungsstadium bilden sich im turbulenten Stirnbereich einer Surge noch geordnete akkretionäre Lapilli, die zuerst sedimentieren. Darüber lagern sich die rückwärtigen Teile der Surge ab, in denen keine geordnete Agglomeration mehr stattfindet. Die Asche klumpt zu mehr oder weniger ungeordneten ash clots, aus denen nach Ablagerung die nassen, wassergesättigten Schichten der späteren Blasentuffe entstehen. Ein Teil der zuvor abgelagerten akkretionären Lapilli verklebt durch Kompaktion mit dieser nassen Tephra.

Die Entstehung zumindest dünnplattiger Blasentuffe durch Ablagerung und Verkleben mehr oder weniger geordneter ash clots und akkretionärer Lapilli aus feuchten Wolken wird durch die Beobachtung gestützt, daß C-Typ Lapilli auch an der Schichtoberseite des Blasentuffs in Lok. 78

auftreten. R-Typ Lapilli sind dagegen nie mit Blasentuffen assoziiert gefunden worden. Auch das spricht für eine Verhinderung der Rindenanlagerung durch erhöhte Partikelkonzentration und erhöhten Wassergehalt.

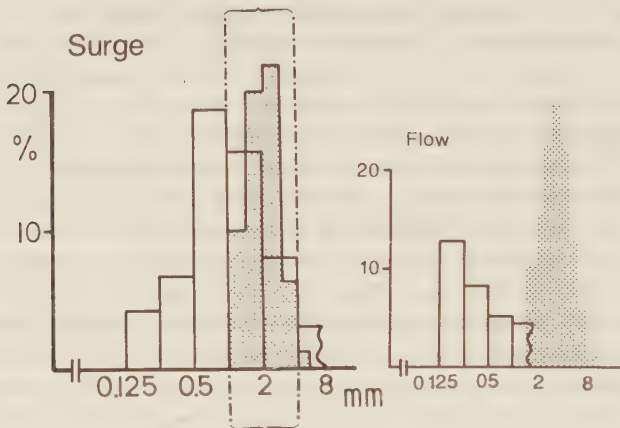


Abb. 6-2: Hydraulische Äquivalentgröße grobkörniger Aschenpartikel und akkretionärer Lapilli (Raster) in Surges und pyroklastischen Strömen. Nur in Surges sind bis 4.5 mm große akkretionäre Lapilli (bis zu 85 % einer Probe) mit 4 mm großen lithischen Partikeln im hydraulischen Gleichgewicht.

Fig. 6-2: Terminal settling velocity of accretionary lapilli is much faster in surges than in pyroclastic flows. The aggregates are suspended by turbulence, not supported by fluidization, which results in smaller aggregate-size spectra in surge deposits because of shorter accretion time. Furthermore, accretionary lapilli should behave like other coarse particles that deposit at the same site (hydraulic equivalence). Depending on their mass, 4.5 mm - sized aggregates should in hydraulic equilibrium with 4 mm - sized lithic grains. In pyroclastic flows the accretionary lapilli are at least partly supported by fluidization, which increases their residence time for agglomeration. Accreted ash is pre-selected by elutriation, as coarse particles and the aggregates are transported in different parts of the flow.

In einem Transportsystem, in dem Einzelpartikel durch ein horizontales Moment transportiert und nicht von Fluidisierung unterstützt werden, sind auch die gebildeten akkretionären Lapilli den gleichen Bedingungen unterworfen - d.h. sie sollten mit grobkörnigen Partikeln im hydraulischen Gleichgewicht stehen: Die Abschätzung der hydraulischen Äquivalentgröße von Partikeln der Matrix und akkretionären Lapilli zeigt, daß grobkörnige, lithische Partikel bis 4 mm Korngröße mit akkretionären Lapilli bis 4.5 mm Durchmesser im hydraulischen Gleichgewicht stehen (Abb. 6-2). Damit sind 75 - 85 % der Aggregate einer Probe erfaßt. Die Bedingung des

hydraulischen Gleichgewichtes von grober Matrix und Aschenaggregaten bewirkt ein enges Größenspektrum akkretionärer Lapilli auch in proximalen Ablagerungen - die Aggregate sind besser sortiert als in Ignimbriten.

In den oberen, feinkörnigeren Regionen einer Suspensions-/Elutriationswolke bilden sich parallel zur Feuchtagglomeration durch elektrostatische Anlagerungskräfte zwischen Partikeln Fall-Lapilli auch während des horizontalen Bodentransports. Die Aggregate sedimentieren gravitativ (Fall-Typ) als mehr oder weniger dichter Lapillischauer aus der Aschenwolke (s.u.).

6.2.2 Akkretionäre Lapilli in pyroklastischen Strömen

Pyroklastische Ströme sind horizontale Massentransportsysteme, die während plinianischer und phreatoplinianischer/-magmatischer Eruptionen durch Eruptionssäulenkollaps oder durch Überquellen der Tephra über den Kraterand entstehen (Taylor, 1958; Hay, 1959; Sparks et al., 1978). Ihre oft beachtliche Mobilität basiert zumindest teilweise auf Fluidisierung der Asche durch vulkanische Gase oder aufgeheizte, atmosphärische Luft (Sparks, 1976; 1978; Wilson, 1980). Es sind quasi subaerische sediment gravity flows, wodurch sie sich von Surges unterscheiden.

Lateral besteht ein pyroklastischer Strom aus Stromkopf, Stromkörper und Schwanz (Wilson & Walker, 1982). Die Teile sind durch ansteigende Partikelkonzentration und abnehmende Turbulenz gekennzeichnet. Vertikal gliedert sich ein Strom in den unteren, lawinenartigen Teil des eigentlichen Stromes und die daraus konvektiv aufsteigende Elutriationswolke - beide Teile gehen kontinuierlich über eine Segregationslage ineinander über. In der Segregationslage werden feinkörnige Aschenpartikel angereichert, die nicht mehr elutriert werden können. Dieser obere Bereich eines pyroklastischen Stromes besitzt ein horizontales Moment, das ausreicht, um ihn vom unteren Lawinenteil abzukoppeln. Die Wolke breitet sich unabhängig aus (Fisher, 1979; Wilson, 1980; Fisher & Heiken, 1982). Aus derartigen, unabhängigen secondary ash clouds entwickeln sich distal turbulente Bodenwolken, in deren Ablagerungen akkretionäre Lapilli häufig sind.

Akkretionäre Lapilli bilden sich in pyroklastischen Strömen im Übergangsbereich Segregationslage/Elutriationswolke, wie man aus der Korngrößenverteilung der agglomerierten Asche im Vergleich zur Matrix schließen kann. Da (1) in Flow-Lapilli generell nur Asche maximal um 0.35 mm Korngröße agglomeriert wird und (2) i.d.R. keine großen Partikel als Agglomerationkeime auftreten, muß eine Korngrößenselektion gegenüber dem Hauptteil des pyroklastischen Stromes stattgefunden haben. Dafür kommen Auftriebskräfte elutrierender Gase in Frage, da in einer untersuchten Staubasche am Top eines Ignimbrits (ULST, Lok. 83) die gleiche Korngröße angereichert ist wie in den akkretionären Lapilli. Zur Agglomeration wird also nur ein begrenztes Kornspektrum angeboten, das die auftretenden Haftkräfte ohne weiteres verarbeiten können. Daher gibt es, anders als in Surges, keine systematischen Unterschiede der

Kornverteilung zwischen großen und kleinen Aggregaten. Die Begrenzung des Korngrößenspektrums durch Elutriation bedingt auch, daß systematische Unterschiede zwischen proximalen R- und distalen C-Typ Lapilli fehlen.

Die feinkörnige Rinde wird schlotnah ebenso wie in Surges durch elektrostatische Anlagerung feinkörniger Partikel aus der Aschenwolke gebildet. Ein diskusförmiger Kern lagert auf seinen Flachseiten mehr feinkörniges Material an, weil (a) die Anlagerungsfläche größer ist und damit die Anziehungskraft zunimmt; (b) seitlich des diskusförmigen Kerns die trennenden Kräfte geringer sind als auf den Schmalseiten (s.u.): So gleicht die asymmetrisch verdickte Rinde teilweise die Abplattung des Kerns aus. Im distalen Bereich ist die Anlagerung einer feinkörnigen Rinde verhindert, da die Wasserdampfkondensation zu weit fortgeschritten ist. Da Abkühlungsrate und Kondensation vom Volumen und der Temperatur eines pyroklastischen Stromes abhängen, sind C-Typ Lapilli in extrem dünn geschichteten Ignimbritlagen kleinvolumiger Ströme bereits in geringer Entfernung vom Eruptionszentrum vorhanden (Bsp. Ignimbrit I in Lok. 94 / 41) (Abb. 6-1).

In pyroklastischen Strömen wird Tephra auf grundsätzlich andere Weise transportiert als in Surges - nämlich durch Fluidisierung unterstützt und dadurch als Lawine fließfähig gemacht. Diesen Transportbedingungen unterliegen auch die sich bildenden akkretionären Lapilli, die ebenfalls vom Gasauftrieb gestützt werden. Dem vertikalen Gasstrom wird die horizontale Komponente lateraler Ausbreitung aufgeprägt. Daraus resultiert möglicherweise eine Art Roll- oder Rotationsbewegung der Aggregate. Aschenpartikel werden nicht mehr allseitig gleichmäßig angelagert, sondern bevorzugt in der Ebene der Rotation. Der Prozeß ist der technischen Rollgranulation ähnlich und führt in pyroklastischen Strömen zu elliptischen akkretionären Lapilli.

Der Gasauftrieb im teilweise fluidisierten pyroklastischen Strom mindert den Schwerkräfteinfluß auf die Partikel, was auch die Verweilzeit der Aggregate in der Suspension verlängert. Zusammen mit der Vorselektion des agglomerierten Kornspektrums ist daher die Frage nach dem hydraulischen Äquivalent von Aggregat und Matrixkorn bedeutungslos. Akkretionäre Lapilli werden in proximalen Ignimbriten größer als in Surges. Erst im distalen Bereich, in dem sich die Reste des Stromes in Form einer turbulenten Bodenwolke ausbreiten, ähneln sich beide Systeme insofern, als das horizontale Moment gegenüber der Fluidisierung an Bedeutung gewinnt. Daraus ergibt sich ein stärker begrenztes Größenspektrum akkretionärer Lapilli, das in der Sortierung demjenigen aus Surges vergleichbar ist.

Außer diesen Flow-Lapilli bilden sich in den Elutriationswolken über pyroklastischen Strömen (wie in Surges) noch Fall-Lapilli mit lockerem Partikelgefüge im Kern. Dieser Aggregattyp entsteht wahrscheinlich unter starkem Einfluß elektrostatischer Kräfte, die die Partikel mit den Punkten gegenpoliger Ladung aneinanderheften. Das lockere Partikelgefüge scheint allgemein für ein niedrigeres Strömungsregime zu sprechen, da die Partikel nicht in dichteste Packung eingeregelt wurden. Dem steht jedoch die Beobachtung entgegen, daß das gleiche Gefüge auch in den Rinden des normalen Flow-Typs ausgebildet ist.

Dieser Widerspruch läßt sich auflösen, wenn man den Begriff niedrigeres Strömungsregime im Sinne von niedrigerer horizontaler Ausbreitungsgeschwindigkeit einer dichten Suspension versteht, in/auf der die Aggregate abrollen. Der Grenzwert der Geschwindigkeit und der Konzentration, der offenbar beide Gefüge voneinander trennt, wird im folgenden Kapitel abzuschätzen versucht. In turbulenten Elutriationswolken können Partikel jedenfalls ein lockeres Aggregat bilden, wie es aus technischer Fluidbettgranulation bekannt ist, solange die Partikel nicht eingeregelt werden. Lockere Aggregate entstehen also durch gemeinsame Wirkung von turbulentem Stoßkontakt und elektrostatischer Anziehung, die den Partikelkontakt durch erhöhte Stoßwahrscheinlichkeit fördert.

6.3 Aschenaggregate in Elutriationsaschenwolken

6.3.1 Verbreitung und Korngrößenverteilung der Ablagerung

In der der Mittleren Laacher See Tephra ist östlich des Laacher Sees eine Staubaschenschicht fächerförmig über mindestens 126 km^2 verbreitet (Abb. 6-3; s.auch 4.1.2). Die Aschenschicht ist durch drei Hauptmerkmale im Gelände gekennzeichnet:

- Hellbraune Farbe;
- für Ignimbrite ungewöhnlicher Reichtum an Bims- und Xenolithlapilli, die aus plinianischem Fallout stammen;
- gleichfarbige akkretionäre Lapilli im Liegenden der Aschenschicht.

Die Mächtigkeit der Schicht ist im Bereich der 4 km vom Laacher See entfernten Lok. 41 mit 12 cm am größten. Von dort nimmt sie auf 1 - 1.5 cm in 17 km Entfernung ab (Lok. NwG). Die Daten: Masse des Aschenfallouts, Masse des plinianischen Fallouts und die Schichtmächtigkeit zeigen, daß die Mächtigkeit von der Masse des plinianischen Fallouts abhängt (Tab. 6-2). Darin drückt sich die unterschiedliche Kompaktion feinkörniger Asche gegenüber Bimslapilli aus. Die regionale Verbreitung der Asche ist daher auf der Basis der Isomassenkarte zu den Fächerrändern hin extrapoliert worden. Innerhalb dieses Gebietes sedimentierten $1.3 \times 10^9 \text{ kg}$ Asche < 0.35 mm Korngröße. Bei einem geschätzten Anteil von 25 % akkretionären Lapilli erhöht sich die Aschenmenge auf $1.65 \times 10^9 \text{ kg}$.

Tabelle 6-2: Schichtmächtigkeit und regionale Massenverteilung der Staubasche.

Table 6-2: Thickness and areal mass distribution of fallout ash.

Loc.:	Thickness (cm)	Plinian Fallout (g/cm ²)	Ash fallout (g/cm ²)
36	9 - 10	2.1	6.6
94	3.5 - 4	2.0	2.4
98	2.5 - 3	1.8	1.6
NE	9	2.5	4.8
41	12	3.7	6.0
Kb	2.5 - 3	0.9	1.0
Bh	5.5	2.5	2.2
Mh-E	4.5	2.3	0.8
And	4.5	---	1.7
Ir	2.0	1.1	0.7
Mh	3.5	2.4	1.6
WB	4.0	2.2	1.1
NwG	1.5	1.0	0.3

Die Korngrößenverteilung der Gesamtablagerung ist ausgeprägt bimodal. Das feinkörnige Verteilungsmaximum liegt bei 15 - 30 μm , das grobkörnige bei 2 - 4 mm; dazwischen existiert ein ausgeprägtes Verteilungsminimum (Abb. 6-4). Die Ablagerung ist mit Inman - Werten um 3.8 - 4.35 sehr schlecht sortiert. Mit zunehmender Entfernung vom Eruptionszentrum verschieben

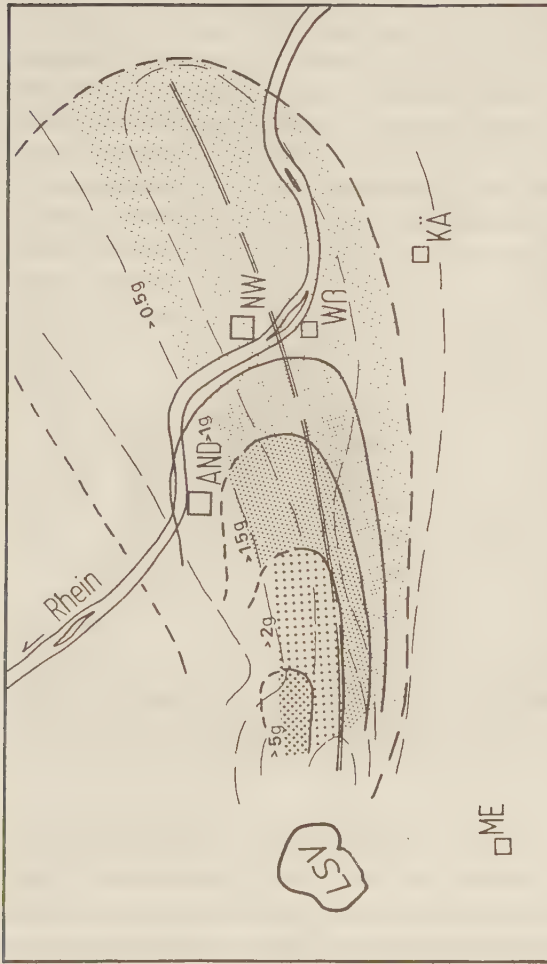


Abb. 6-3: Der Ablagerungsfächer der Staubasche in der MLST (Ignimbrit I) östlich des Laacher Sees ist mit dem plinianischen Bimsfallout im gleichen stratigraphischen Intervall deckungsgleich (Isopachen gestrichelt; nach Bogaard, 1983).

Fig. 6-3: Areal distribution of the fallout dust layer associated to the MLST. The distribution of the ash deposit mimics distribution pattern of the Plinian fallout of the same stratigraphic unit (stippled isopachs after Bogaard, 1983), indicating deposition from a wind-drifted ash cloud.

sich das grobkörnige Maximum und das Minimum systematisch zum Feineren, während sich das feinkörnige Maximum nur wenig verändert.

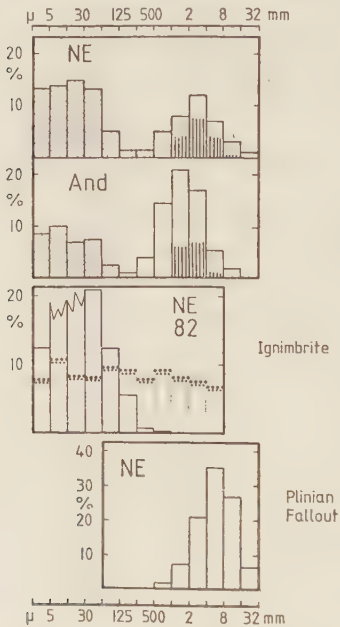


Abb. 6-4: Vergleich der Korngrößenverteilung der untersuchten Aschenschicht mit einem Ignimbrit und einem plinianischen Fallout (Ignimbrit in Overbankfazies Lok. NE; in Talfazies gepunktet Lok.82; Fallout Lok. NE, vertikale Schraffen = Xenolithe).

Fig. 6-4: Bulk sample grain-size distribution of co-ignimbrite ash compared to an ignimbrite and a Plinian fallout deposit (vertical hatches = lithic fraction). The size-distribution of the coarse-grained part of the deposit is similar to the size-distribution of the Plinian fallout, which suggests that the deposit also has a Plinian fallout component (ignimbrite in overbank facies: loc. NE; in valley facies (dotted lines): loc. 82 - dotted; Plinian fallout: loc. NE)

Ein Korngrößenvergleich mit Ignimbriten und plinianischem Fallout zeigt, daß Ignimbrite weder in Overbank-, noch Tal-Fazies eine derart ausgeprägt bimodale Korngrößenverteilung haben (Abb. 6-4). Die Schicht insgesamt wird als Aschenfallout mit überlagerndem plinianischen Lapillifallout interpretiert: Der Aschenfallout sedimentierte in Form von akkretionären Lapilli und als ash cluster aus einer Ko-Ignimbrit Aschenwolke. Der plinianische Fallout ist mit symmetrischer Korngrößenverteilung gut sortiert (Inman-Werte um 1.1 - 1.2). Der Xenolithanteil beträgt proximal ca. 50 Gew.%; das ist gegenüber ca. 30 Gew.% in mächtigeren Fallout-Lagen des gleichen stratigraphischen Intervalls hoch.

Das Aschensediment

Das Aschensediment ist schwach normal gradiert. Seine Korngrößenverteilung ist bei schwacher Schiefe zum Feinkörnigen bimodal und besitzt die gleichen Merkmale wie die in akkretionären Lapilli agglomerierte Asche (Kap. 4.2.1). Die Korngrößenverteilung der Asche verändert sich im Bereich $< 45 \mu\text{m}$ mit zunehmender Entfernung von Eruptionszentrum nur allmählich, während sich zugleich das grobkörnige Verteilungsmaximum systematisch zum Feineren verlagert und dabei das Minimum überdeckt (Abb. 6-5). Die Merkmale stimmen mit der Asche der Mount St.Helenseruption vom 18. Mai 1980 überein (Carey & Sigurdsson, 1982; Abb. 3). Das deutet darauf hin, daß die Asche ebenfalls als ash cluster sedimentiert wurde. Obwohl das Kornspektrum der Aschenwolke ohne Selektion agglomeriert wird, sind (a) die Kerne akkretionärer Lapilli an einer Lokalität immer grobkörniger als der zugehörige Aschenfallout, der später sedimentiert.

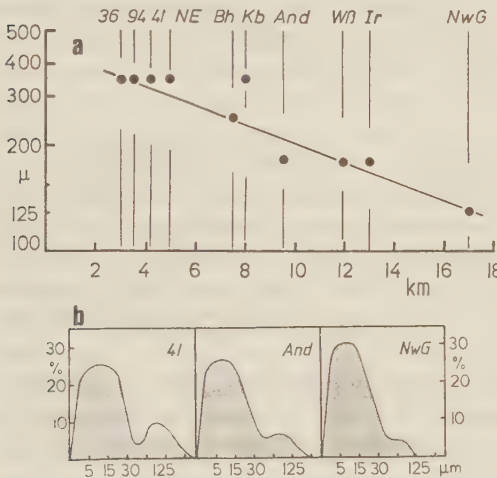


Abb. 6-5: (a) Abnahme maximaler Korngröße mit zunehmender Transportweite. (b) Das grobkörnige Verteilungsmaximum der Staubasche überdeckt mit zunehmender Entfernung vom Laacher See das Minimum bei $40 \mu\text{m}$.

Fig. 6-5: (a) Maximum grain-size of the co-ignimbrite ash decreases with increasing distance from vent. (b) The proximal coarse mode of the co-ignimbrite layer migrates towards decreasing grain-size and merges with the fine mode at about 9 km east of Laacher See.

Das erscheint zunächst nicht ungewöhnlich, da sich die akkretionären Lapilli zwar ohne Korngrößen Selektion bilden, aber aufgrund ihrer Fallgeschwindigkeit als erstes zu Boden fallen. Sie entziehen so der Aschenwolke einen gewissen grobkörnigen Anteil, so daß die Aschenwolke insgesamt feinkörniger wird.

(b) Die Korngrößenverteilung der akkretionären Lapilli kann mit der Korngrößenverteilung des Aschenfallouts einer schlotnäher gelegenen Lokalität korreliert werden (Abb. 6-6). -

Ein akkretionärer Lapillus mit einer Fallgeschwindigkeit von $> 5 \text{ m/sec}$ sedimentiert größeres Korn in einer größeren Entfernung, als die gleiche Korngröße als Einzelkorn mit nur $< 1 \text{ m/sec}$ Sinkgeschwindigkeit sedimentiert. - Ein Paradoxon? (Diskussion s. unten)

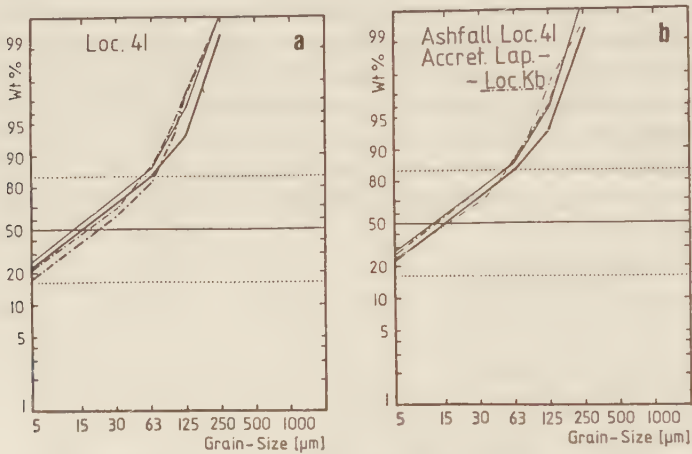


Abb. 6-6: Kornverteilung der Asche in akkretionären Lapilli und in der Staubasche. (a) Lok. 41: Akkretionäre Lapilli (gestrichelt) sind trotz identischer Verteilungsobergrenze grobkörniger als die Matrix. (b) Vergleich von proximaler Staubasche (Lok. 41) und schlotferner abgelagerten akkretionären Lapilli (Lok. Kb; gestrichelt). Die Kornverteilung im Kern distaler akkretionärer Lapilli ist schlotnäherem Fallout ähnlich.

Fig. 6-6: Ash-size distribution of accretionary lapilli and co-ignimbrite ash. (a) Loc. 41: In spite of similar maximum grain-size, the accretionary lapilli (stippled) are systematically coarser grained than the enclosing ash. (b) The grain-size distribution of the ash from accretionary lapilli resembles that of the co-ignimbrite ash deposited closer to the source. This suggests that ash clusters formed near the source, and were transported to greater distances. A certain amount of clusters agglomerated to form accretionary lapilli during transport. Thus, ash-size variation within the lapilli was really inherited from the clusters and corresponds to that of the ash cloud closer to the source.

6.3.2 Rekonstruktion des Ablagerungsprozesses

Entstehung der Aschenwolke

Ich postuliere, daß die Aschenwolke als (Ko-Ignimbrit) Aschenwolke aus einer kollabierenden Eruptionssäule entstand und in einer kurzzeitigen Ruhepause des Schlotversturzes des Laacher See Vulkans abgelagert wurde.

Sparks & Walker (1977) diskutieren drei Möglichkeiten der Entstehung von Ko-Ignimbrit Aschenwolken:

- (a) Elutriation aus pyroklastischen Strömen;
- (b) Elutriations-/Deflationswolken, die vom Ort des Eruptionssäulenkollapses aufsteigen;
- (c) Aschenwolken, die aus einer Aschenfontaine einer ignimbrite eruption (Walker 1973) aufsteigen.

Elutriation aus pyroklastischen Strömen ist auszuschließen, weil (a) die Verbreitung der Asche vom heutigen Laacher See Ringwall ausgeht; (b) die Verbreitung von den Ignimbriten südlich des Eruptionszentrums unbeeinflusst ist und der Aschenfächer parallel zum plinianischen Fallout des gleichen stratigraphischen Intervalls verbreitet ist (Abb. 6-3); (c) die Gradierung der Ablagerung auf ein einmaliges Entstehungsereignis der Aschenwolke hindeutet.

Die Korngrößenverteilung der feinkörnigen Asche ist ein wichtiges Argument in der Diskussion der Entstehung der Aschenwolke: Die Asche ist signifikant feinkörniger als die Ignimbrite im Liegenden der Aschenschicht (Abb. 6-4); eine Kornverteilung mit nur 0.5 Gew.% > 0.25 mm ist in Ignimbriten der Laacher See Tephra bislang nicht bekannt. Wenn solch feinkörnige Asche aber bereits in 2.5 - 3 km Entfernung vom Schlot verbreitet ist, muß sie selektiv in einer Aschenwolke angereichert worden sein: Die Kornverteilung entspricht grob gesehen der Elutriationsasche eines Ignimbrits der ULST(Lok. 83) (Kap. 4.2.2).

Die Ablagerung der Aschenwolke erfolgte während einer Eruptionspause zur Zeit eines tektonischen Schlotversturzes des Laacher See Vulkans (Bogaard, 1983). Der Verstoß schnitt den Gasschubteil der Eruptionssäule ab, so daß sie kollabierte. Dadurch entstand am Boden ein pyroklastischer Strom mit drei Fließeinheiten unmittelbar im Liegenden der Aschenschicht. Die Ablagerung der feinkörnigen Asche ist nur in einer Eruptionspause möglich, weil (a) die zeitlichen Abstände zwischen einzelnen Strömen bzw. deren Fließeinheiten wahrscheinlich zu kurz sind, die Asche sedimentieren zu lassen; weil (b) eine Korngröße sedimentiert wird, die auch aus gerade abgelagerten Ignimbriten elutriert wird - also der konvektive Auftrieb vom Boden die Sinkgeschwindigkeit der Partikel übersteigt; weil (c) die Windverdriftung der Wolke aus Schlotnähe vom Luftstrom, der durch Einsaugen von Luft in den Freistrahle des Gasschubteils einer Eruptionssäule erzeugt wird, verhindert würde.

Ausgangsbedingungen der Sedimentation

Die Aschenwolke wurde als umgekehrter, elliptischer Kegelstumpf einer pilzförmigen Konvektionswolke mit 3000 m vertikaler Ausdehnung modelliert. Bei einer lateralen Ausdehnung

von 2250 m am Top (initialer akkretionärer Lapilli-Fallout in Lok. 15b und 94) ergibt sich ein Ausgangsvolumen von 7.5 km^3 , in der alle Asche konzentriert sein soll. Bei homogener Verteilung ergibt das eine Massenkonzentration von 200 g/m^3 , wenn man den Anteil akkretionärer Lapilli mit 25 % annimmt. Ist die Asche als Einzelkorn suspendiert, kann nach Reimer (1983b) der mittlere Partikelabstand ermittelt werden, wenn die Korngrößenverteilung bekannt ist (Abb. 6-7,-8). Da akkretionäre Lapilli das Kornspektrum von Elutriationswolken ohne Selektion anlagern, kann umgekehrt die Kornverteilung einer Wolke aus den Kernen akkretionärer Lapilli abgeleitet werden: So wurde die primäre Kornverteilung als das Mittel der schlotnah abgelagerten akkretionären Lapilli der Lok. 15b und 94 angenommen. Tabelle 6-3 zeigt, daß der Partikelabstand sehr feinkörniger Asche im Bereich der Korngröße grober Partikel liegt.

Tabelle 6-3: Korngrößenverteilung und mittlerer Partikelabstand in der Ko-Ignimbrit Aschenwolke.

Table 6-3: Grain-size distribution and mean particle spacing.

Size: (μm)	Initial stage			10 km Drift		
	Wt. %	Mass (g)	Spacing (mm)	Wt. %	Mass (g)	Spacing (mm)
> 250	0.7	1.4	28.0			
180	0.9	1.8	18.0	0.7	0.2	35.0
125	2.7	5.4	8.6	1.3	0.3	24.5
90	5.4	10.8	5.0	1.9	0.4	16.0
63	7.7	15.4	3.0	5.3	0.9	8.0
45	15.4	30.8	1.7	8.4	1.5	4.7
30	13.7	27.4	1.2	12.6	2.2	2.7
15	20.0	40.0	0.5	20.3	3.6	1.2
< 15 (7.5)	33.7	67.7	0.2	48.8	8.6	0.4

Insgesamt gesehen sind die Bedingungen für Aggregatbildung günstig: Geringer Partikelabstand, elektrostatische Felder in der Atmosphäre - in der Deflationswolke und im Umfeld der gerade kollabierten Eruptionssäule, sowie starke konvektive Turbulenz nach dem Säulenkollaps: Die Auftriebsgeschwindigkeit V_{elu} (Elutriation) der Konvektion in der Aschenwolke kann wie folgt berechnet werden (Wilson, 1976):

$$V_{\text{elu}} > V = (8g r_0 D_0 / (3CP_0))^{1/2}$$

V = Gasgeschwindigkeit;

r_0 = Partikelradius ($2.5 \times 10^{-4} \text{ m}$);

D_0 = Partikeldichte (2500 kg/m^3);

g = Erdbeschleunigung;

C = Reibungskoeffizient (etwa 1);

P_0 = effektive Gasdichte (etwa 0.2 kg/m^3);

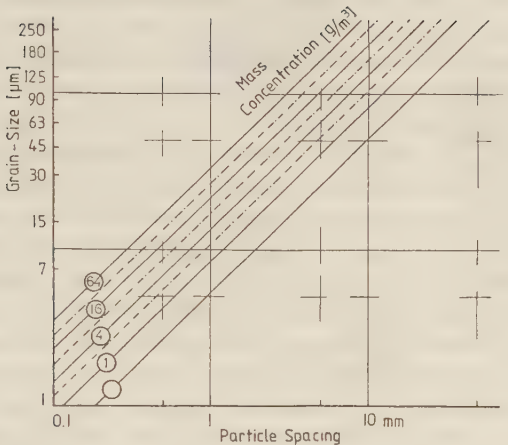


Abb. 6-7: Diagramm zur Bestimmung des mittleren Partikelabstandes in Aschenwolken aus den Parametern Korngröße und Massenkonzentration in g/m^3 (nach Reimer, 1983).

Fig. 6-7: Mean particle spacing in ash clouds as a function of grain-size and mass concentration (g/m^3) (after Reimer, 1983).

Mit diesen von Sigurdsson & Carey (in Vorb.) zugrundegelegten Werten für C und P_0 ergibt sich eine Gasgeschwindigkeit V von 9 m/sec. Der Wert für V_{elu} muß also größer sein als 9 m/sec.

Aggregatbildung

In diesem initialen Stadium der Aschenwolke entstehen zwei verschiedene Arten von Aggregaten, nämlich ungeordnete ash cluster und geordnete akkretionäre Lapilli. Es gibt wahrscheinlich eine ganze Reihe von ash clustern, deren feinkörniges Endglied aus Asche < 180 μm besteht. Diese Kornverteilung entspricht dem Aschenfallout < 200 km östlich des Mount St.Helens bzw. der Verteilung der experimentell an der Platte angelagerten Asche. Das grobkörnige Endglied besteht aus groben Einzelkörnern und anhaftenden feinen Aschenteilchen. Die Kornverteilung entspricht den Fallout < 50 km der Mount St.Helens Eruption, bzw. dem experimentellen lag fall - Sediment. Die Aschenaggregate entstehen in einer Wolke mit relativ hoher Aschenkonzentration. Die Partikelkontakte werden durch Turbulenzen herbeigeführt, elektrostatische Felder und Ladungen aus den Partikeln erhöhen die Stoßwahrscheinlichkeit (Paluch, 1970). Ein gewisser Anteil kondensierter Feuchtigkeit auf den Partikeln ist für längerfristige Haftung notwendig (s.u.).

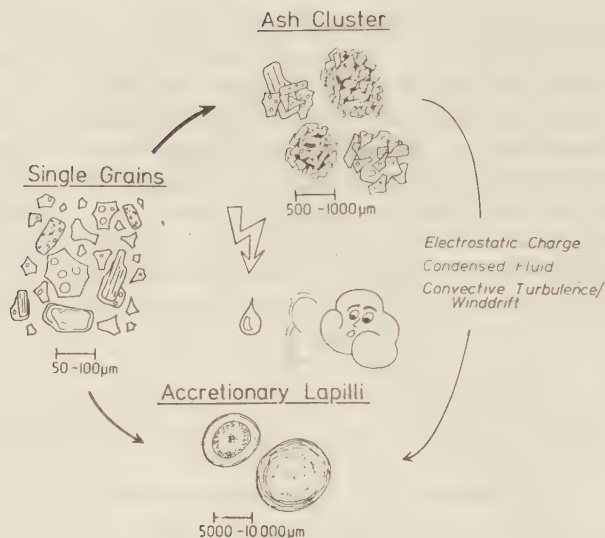


Abb. 6-8: Durch Stoßkontakt elektrostatisch geladener Aschenpartikel bilden sich vermutlich über ein Vorstadium des ash clusters akkretionäre Lapilli, wenn die cluster in turbulenten Wolken durch weitere Zusammensöße zu größeren Gebilden agglomeriert werden.

Fig. 6-8: Accretionary lapilli form in elutriation clouds probably from ash clusters, which have previously formed from electrostatically charged single grains. Ash clusters and other grains further agglomerate through collision contacts, which are enhanced by electrostatic fields, within a turbulent cloud. A certain amount of condensed fluid is necessary to bind particles together, because the electrostatic charge is neutralized through time.

Die Korngrößenverteilung der Asche in akkretionären Lapilli liefert Hinweise darauf, daß sie durch weitere Agglomeration der ash cluster entstanden sind. Nur so ist plausibel zu erklären, daß akkretionäre Lapilli, die eine höhere Fallgeschwindigkeit haben als einzelne Aschenpartikel, einen höheren Anteil Asche $> 0.25\text{ mm}$ in größerer Entfernung vom Laacher See ablagern als im Aschenfallout der gleichen Lokation zu finden ist.

Die Agglomeration selbst vollzieht sich durch Zusammenstoß der ash cluster und weiterer Körner in der turbulenten Wolke. Die elliptische Form der proximal verbreiteten akkretionären Lapilli liefert den Hinweis dafür, daß die Aggregate möglicherweise während der Bildung rotierten. Die oben abgeschätzte Geschwindigkeit vom 9 m/sec entspricht grob gesehen der minimalen Ausbreitungsgeschwindigkeit der aggregatführenden pyroklastischen Ströme (Freundt & Schmincke, 1986; Schumacher & Schmincke, 1989). Außerdem bilden sich

akkretionäre Lapilli in Strömen im Grenzbereich Lawinenteil - Elutriationswolke, der sich wahrscheinlich langsamer ausbreitet als der eigentliche Lawinenteil.

Dennoch scheint ein Gegensatz zwischen Bildung der Aggregate unter Rotation und dem lockeren Partikelgefüge zu bestehen. Für die Ausbildung des Interngefüges - locker porös oder dicht gepackt - scheinen allgemein Strömungsgeschwindigkeit und Massenkonzentration die bestimmenden Faktoren zu sein. Bei einer niedrigeren Konzentration in einer Aschenwolke muß automatisch der elektrostatischen Anlagerung = Einfangen der Partikel über eine gewisse Distanz größere Bedeutung zukommen als in hochkonzentrierten Wolken. Da die akkretionären Lapilli nicht während horizontaler Ausbreitung einer Suspension gebildet werden, sondern in turbulenter Konvektion, ist der Bildungsprozeß noch mehr der technischen Fluidbettgranulation ähnlich als in pyroklastischen Strömen. D.h. lockere Aggregate werden wie in der Industrie viel häufiger entstehen, da die Partikel nicht "durch Rollen auf einer Unterlag" eingeregelt werden und Feinkorn nicht zwischen gröberes Korn eingedrückt wird. Die Partikel haften vielmehr so, wie sie auftreten. Kapillarkräfte der Fluidbrücken zwischen den Partikel verhindern eine Einregelung der Partikel in dichteste Packung, so die Benetzung das Maß für die Bildung Starrer Aggregate nicht überschreitet (vgl. Menold, 1986). Das Gefüge impliziert daher ein scheinbar geringeres Regime.

Ein generelles Problem der Agglomeration in schlotnahen, heißen Aschenwolken ist die Realisierung der Haftkräfte zwischen Partikeln. Elektrostatische Kräfte, die eine Anlagerung der Partikel bewirken, nehmen stetig ab, da sich die Ladungen über die Kontaktstellen ausgleichen. Es müßten also im Augenblick des Kontaktes Fluidbrücken die Partikelhaftung übernehmen. Das ist denkbar, wenn man annimmt, daß in solchen Aschenwolken elektrostatische Felder Kondensation von Wasserdampf mit gelösten Stoffen wie SO_2 und CO_2 (weit) oberhalb des eigentlichen Kondensationspunktes ermöglichen (Mayer-Schwinning & Rennhack, 1980; Gebhard, pers.Mitt.). Bei Atmosphärendruck kann Kondensation schon ab $120^0 - 130^0$ C einsetzen, wodurch sich der Bereich der Fluidfilmbildung auf heißen Aschenpartikeln beträchtlich erweitert. Die Bedeutung dieses Problems läßt sich daran ermessen, daß Banks & Hoblitt (1981) in einer Ko-Ignimbrit Aschenablagerung nördlich des Mount St.Helens einige Tage nach der Eruption noch 159^0 C gemessen haben. Bildung akkretionärer Lapilli in Elutriationswolken ist in gewisser Weise auch eine Feuchtagglomeration (s.Kap.5.2).

Sedimentation aus der Aschenwolke

Die Ablagerung aus der Aschenwolke beginnt proximal neben einsetzendem Aschenfall mit einem initialen Schauer akkretionärer Lapilli. Ein proximales, grobkörniges lag fall - Sediment gibt es nicht, da Sedimentation feinkörniger Asche aus den unteren Teilen der Aschenwolke dessen Bildung im Ansatz überprägt hat. Die proximale Verbreitung feinkörniger Asche, auch wenn sie als cluster sedimentierte, läßt auf sehr geringe laterale Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wolke schließen. Andernfalls wäre eine stärkere Fraktionierung zwischen clustern und groben Einzelkörnern durch Windsichtung nachzuweisen, denn cluster sedimentieren wesentlich langsamer als Einzelkörner.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Aschenwolke kann nach $v = s : t$ abgeschätzt werden:

s = Entfernung, in der ein Partikel sedimentiert;

t = Verweilzeit des Partikels in der Schwebelage = Fallhöhe : Sinkgeschwindigkeit ($H : V_G$).

Es ergibt sich für die Driftgeschwindigkeit: $v = s \cdot V_G : H$

Die Driftgeschwindigkeit wird für die Obergrenze der Korngrößenverteilung des Fallouts berechnet, da diese Partikel mit partikelspezifischer Sinkgeschwindigkeit sedimentieren. Bei Berechnung von v mit Sinkgeschwindigkeiten realer Aschenpartikel (Mittelwerte für Partikel der Dichte 1.75 - 2.0 nach Wilson & Huang, 1979) ergibt sich für Sedimentation vom Top der Aschenwolke aus 3000 m für Partikel:

0.25 mm - V_G ca 64 cm/sec - in Lok. Bh - $v = 1.6$ m/sec;

0.18 mm - V_G ca 45 cm/sec - in Lok. Wß - $v = 1.8$ m/sec;

0.09 mm - V_G ca 25 cm/sec - in Lok. NWG - $v = 1.4$ m/sec;

Im Mittel beträgt die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Aschenwolke also 1.6 m/sec. Eine grobe Abschätzung der Ausbreitungsgeschwindigkeit für die Sedimentation von 90 µm großen Kugeln der Dichte 2.5 ergibt eine höhere Driftgeschwindigkeit $v = 2.83$ m/sec (1.7fache des obigen Mittelwertes), da Kugeln infolge eines geringeren Reibungswiderstandes eine höhere Fallgeschwindigkeit haben. Man kann davon ausgehen, daß die tatsächliche Geschwindigkeit zwischen 1.6 und 2.8 m/sec gelegen hat.

Carey & Sigurdsson (1982) legten ihren Berechnungen der Abdrift der Mount St. Helens - Aschenwolke eine aggregatspezifische Sinkgeschwindigkeit der cluster von 35 cm/sec zugrunde. Derartige Aggregate würden ca. 14 km (ca. 24 km für $v = 2.8$ m/sec) östlich des Laacher See Vulkans sedimentieren. Bei einer angenommenen Verbreitungsgrenze von 20 km bedeutet das entweder die Neubildung von ash clustern während der Drift der Wolke, oder es erreichen nur sehr langsam mit 24 cm/sec sinkende cluster die angenommene, distale Verbreitungsgrenze.

Vergleicht man die regionale Verbreitung maximaler Korngröße im Fallout und in den akkretionären Lapilli miteinander, so ergeben sich wichtige Schlußfolgerungen: Grobkörnige Partikel, die in clustern agglomeriert sind, sedimentieren langsamer mit aggregatspezifischer Sinkgeschwindigkeit als das jeweilige Einzelkorn (Tab. 6-4); d.h. agglomerierte grobkörnige Partikel werden in größerer Entfernung vom Eruptionszentrum abgelagert als isolierte Einzelkörner (Sorem, 1982). Feinkörnige Partikel werden gleichzeitig in geringerer Entfernung sedimentiert, da sie in clustern gebunden schneller fallen. Die zweite Folgerung betrifft die Bildung akkretionärer Lapilli: Da grobkörniges Material in diesen Aggregaten in größerer Entfernung abgelagert wird als die Einzelkörner in der Aschenschicht, müssen akkretionäre Lapilli (a) zumindest teilweise aus clustern aufgebaut sein, - ash cluster sind ein Vorstadium des Fall-Typs akkretionärer Lapilli. (b) Akkretionäre Lapilli werden ständig in der Aschenwolke neugebildet, da mit der Transportweite der Anteil feinkörniger Asche in den akkretionären Lapilli zunimmt (Kap. 4.2.1). Es gibt also nicht, wie Self (1983) annimmt, nur einen Bildungsort akkretionärer Lapilli in einer Aschenwolke über dem Eruptionszentrum.

Tabelle 6-4: Sinkgeschwindigkeiten unterschiedlicher Aschenpartikel und Aggregate (Daten für Aschenpartikel aus Wilson & Huang, 1979).

Table 6-4: Settling velocities of particles in air (data for ash particles after Wilson & Huang, 1979).

Size	Ash particles (Density 1.7-2)	Balls (Density 2.0)	Ash cluster (?)
0.250 mm	64.2 cm/sec	170 cm/sec	
0.180 mm	57.7	100	
0.125 mm	31	65	
0.090 mm	27	40	35 - 40 cm/sec

Bis etwa 10 km Entfernung vom Laacher See bilden akkretionäre Lapilli eine durchgehende Lage, etwa 4 - 1.5 cm unterhalb der Aschenschicht. Die geschätzte Massenkonzentration in der Wolke beträgt noch ca. 20 g, für die spontane Bildung akkretionärer Lapilli offenbar groß genug, da noch feinkörnige Rinden angelagert werden. Der mittlere Partikelabstand in der Aschenwolke beträgt für Einzelkornverteilung der Fraktion < 15 μm (wie 7.5 μm modelliert) noch 0.42 mm. Das entspricht etwa dem 2 - 2.3fache des größten Partikeldurchmessers, oder anders ausgedrückt, es bewegen sich noch immer ausreichend feinkörnige Partikel in Reichweite elektrostatischer Anziehung.

Im distalen Bereich hat die Aschenkonzentration in 17 km Entfernung auf < 3 g/m³ abgenommen. Läge die Asche < 90 μm Korngröße noch als Einzelpartikel vor, ergäbe sich ein mittlerer Partikelabstand von 0.65 mm der Fraktion < 15 μm - d.h. das 6-7fache des größten Partikeldurchmessers und auch jenseits der Entfernung, über die Partikel elektrostatisch angelagert werden können. Wahrscheinlich ist aber die gesamte Asche bereits als cluster agglomeriert, so daß nun der (noch größere) Aggregatabstand maßgeblich wird. Ich möchte an dieser Stelle dahingestellt sein lassen, ob es denkbar ist, allein durch Winddrift und Luftverwirbelung bei derartig niedrigen Konzentrationen geordnete, konzentrische akkretionäre Lapilli entstehen zu lassen; im distalen Fallout der Mount St. Helens Eruption 1980 sind bei etwa gleicher Konzentration (s. unten) keine akkretionären Lapilli bekannt. Daß dennoch vereinzelt akkretionäre Lapilli auftreten, hat einen besonderen Grund:

6.3.3 Plinianischer Fallout

Der Anteil der Fraktion > 0.25 mm in akkretionären Lapilli steigt mit der Lokalität Andernach-Krahenberg (Kb) beginnend nach Osten mit zunehmender Entfernung vom Eruptionszentrum wieder an. In Lok. NWG hat er 1.2 Gew.% erreicht, das ist das 2fache des Wertes proximaler Ablagerungen Lok. 15b und 94.

Die grobkörnigen Partikel stammen aus dem plinianischen Fallout eines kurzen Eruptionspulses, der nach dem tektonischen Schlotverschluß die Versturzmassen aus dem Schlot

ausschleuderte. Der hohe Xenolithgehalt von 50 Gew.% gegenüber 25-30 Gew.% in anderen Fallout-Lapillischichten spricht für Schloträumung (Bogaard, 1983). Während dieser Phase konvektierender Eruptionssäule entstand keine deutlich von den umgebenden Aschenschichten abgesetzte Fallout-Lapillischicht, weil (a) diese Schloträumungsphase nur sehr kurz war und (b) der plinianische Fallout in das nicht kompaktierte, lockere Sediment des Aschenfallouts hineinfiel. Während der Sedimentation sammeln Aschenpartikel $> 125 \mu\text{m}$ als Agglomerationskeime ash cluster aus der Aschenwolke und lagern sie an. Nur so erscheint bei einer Massenkonzentration von $\text{ca. } 3 \text{ g/m}^3$ und einer langsamen Winddrift von 1.6 - 2.8 m/sec die Bildung akkretionärer Lapilli möglich.

6.4 Verfestigung akkretionärer Lapilli

6.4.1 Blasenbildung

Blasen sind in akkretionären Lapilli aus Ignimbriten der MLST häufig, in Surges der ULST dagegen selten. Gelegentliche Häufung um agglomerierte Bimspartikel, oder Regelung der Aschenpartikel entlang der Blasenwände deuten auf Bildung nach der Agglomeration. Es ist möglich, daß es sich sowohl um später entmischte, juvenile Gase, als auch um während der Trocknung verdampftes Haftwasser handelt.

Während der Probenbearbeitung wurde beobachtet, daß sich im Probenkuchen ($< 63 \mu\text{m}$) in der Abdampfschale während der Trocknung zahlreiche Blasen bilden, wenn noch ein Rest H_2O_2 der Aufbereitung im Wasser enthalten war. Das abgespaltene O_2 diffundiert nicht ab, sondern sammelt sich in Blasen, während Wasser wahrscheinlich kapillar entlang der Korngrenzen nach Außen wandert und an der Oberfläche des Probenkuchens verdunstet.

Möglicherweise entstehen Blasen in akkretionären Lapilli auf ähnliche Weise: Entmischte, vulkanische Gase sammeln sich und bilden im noch feuchten Aggregat displaziv Blasen. Im dichten Gefüge der akkretionären Lapilli aus Ignimbriten und Surges ist weder ausreichend Porenraum, noch ausreichend Wegsamkeit zur Abwanderung des Gases.

Es kann sich aber auch um verdampftes Haftwasser der Fluidbrücken handeln. In diesem Falle wäre der Blasengehalt in akkretionären Lapilli u.U. ein einfaches Mittel zur Unterscheidung heißer, trockener und warmer, feuchter Transportsysteme:

Pyroklastische Ströme plinianischer Eruptionen sind meist heiße, wasserdampfarme Transportsysteme, in deren Ablagerungen noch nach Tagen Temperaturen $> 500^\circ\text{C}$ erhalten sein können (Fisher & Schmincke, 1984). Auch in geringmächtigen Einzellagen können hohe Temperaturen herrschen, wenn sie in schneller Folge abgelagert werden. Fluidfilme auf den Partikeln können verdampfen und der Wasserdampf kann sich mit entmischem Gas in Blasen sammeln. Bei phreatomagmatischen Eruptionen wird die meiste Wärmeenergie zur Aufheizung des externen Wassers umgesetzt, so daß häufig nur warme, wasserdampfüberladene Transportwoiken entstehen. Die niedrigere Temperatur in den Ablagerungen läßt auch die

Fluidfilme um die Partikel langsamer trocknen, so daß zumindest ein Teil des Wassers kapillar aus dem Aggregat abwandern kann.

Blasenreiche akkretionäre Lapilli sollten demnach für heiße Systeme, blasenarme Aggregate für kühle, nasse Systeme typisch sein: Nicht nur Aggregate der phreatomagmatischen ULST sind blasenärmer, sondern auch die der Uwekahuna-Asche oder vom Kraterrand der Fossa di Vulcano.

Die Häufigkeit von Blasentuffen in phreatomagmatischen Ablagerungen steht nicht im Widerspruch zu dieser Hypothese. Durch schnelle, mehr oder weniger en masse Ablagerung und anschließende Kompaktion nasser ash clots (s.Kap.6.2.1) kann fluidisierendes Gas zwischen den Agglomeraten eingeschlossen werden, wie es Lorenz (1974) als alleinige Bildungsursache ansieht. Ich vermute aber, daß auch (oder gerade hier) in den mehrere cm dicken Blasentufflagen, die von Lorenz untersucht wurden, Blasen < 1 mm Größe durch verdampfendes Wasser entstanden sind, wenn die feinkörnige Asche Migration der Gasphase verhindert.

6.4.2 Zementation

Akkretionäre Lapilli sind meist stärker verfestigt als das umgebende Sediment. Die geordnete Internstruktur und der Wassersättigungsgrad im Aggregat - d.h. die Menge Fluidbindemittel während der Agglomeration scheinen dabei von ausschlaggebender Bedeutung zu sein: Aggregate aus Bodentransportsystemen mit ihrem dichten Partikelgefüge sind härter als diejenigen aus windverdrifteten Aschenwolken, in denen nur punktförmige Partikelkontakte ausgebildet sind. Für den Einfluß des Wassergehaltes sprechen zwei Beobachtungen: (a) Festigkeitsunterschiede bestehen zwischen akkretionären Lapilli aus lockeren Ignimbriten und solchen aus Blasentuffen. (b) Unterschiede bestehen zwischen dem Ignimbrit und dem Blasentuffhorizont.

Bleibende Festigkeit, abhängig vom Sättigungsgrad an Fluidbindemittel während der Agglomeration, deutet auf Bildung von Festkörperbrücken. Allgemein bilden sie sich entweder durch Auskristallisation/Fällung gelöster Stoffe, oder durch Rekristallisation amorpher Partikeloberflächen (Schubert, 1979; Charé et al., 1976; Schmoll, pers.Mitt.). Unter dem Rasterelektronenmikroskop erkennt man aber nur saubere Kornkontakte ohne Bindemittelbrücken zwischen den Partikeln.

Auskristallisation gelöster Stoffe

Da absolut reine Flüssigkeiten in Gegenwart von Feststoffen selbst bei sehr geringer Löslichkeit nicht existieren, können geringe Mengen gelöster Substanzen, die während der Aggregattrocknung auf die kleiner werdenden Flüssigkeitsmenisken konzentriert werden, eine Festkörperbrücke zwischen den Partikeln aufbauen. Kondensierte Feuchtigkeit aus vulkanischen

Wolken wird gelöste Stoffe enthalten, die zur Brückenbildung beitragen können. Möglicherweise besitzen die Kondensate durch gelöstes SO_2 , Cl, F etc. korrodierende Eigenschaften, so daß die Kontaktstellen in geringem Maße angelöst werden und nach Trocknung Festkörperbrücken bilden.

Zementationseigenschaften vulkanischer Gläser

Zahlreiche vulkanische Gläser, so auch die Laacher See Phonolithe, besitzen in feuchtem Zustand zementähnliche Abbindeigenschaften (Puzzolane). Nach Ames (1975) setzt die Abbindereaktion in einem Puzzolan - CaOH - Wasser Gemisch bereits bei Raumtemperatur ein. Die Zeolithe des Puzzolan Gemisches bilden dabei mit dem Ca -Hydroxid neue Zementminerale (Mumpton, 1975). Möglicherweise kann die Verfestigung vulkanischer Aschenaggregate als Puzzolan-ähnliche Reaktion an den Kornkontakten verstanden werden, wenn bei feuchtwarmen - heißen Bedingungen erste Umwandlungsreaktionen einsetzen, die später zur Zeolithisierung führen.

Früheste chemische Umwandlungsreaktionen konnte Wohletz (1986) durch Analyse der Oberflächenschichten von Tephrapartikeln nachweisen. Aschen, die während phreatomagmatischer Explosionen gebildet wurden, haben eine andere chemische Zusammensetzung ihrer Oberfläche als gröbere Partikel, die in anschließender magmatischer Eruption entstanden sind. Das bedeutet, daß bereits während einer phreatomagmatischen Eruption und anschließender Ablagerung Alterationen auf der Partikeloberfläche ablaufen. Experimentelle Studien zur Alteration von Gläsern, die die Arbeitsgruppe um Prof. Touray (Orléans) durchgeführt hat, bestätigen erste Umwandlungsreaktionen bereits nach 15 Min. Reaktionszeit. Auf den Glasoberflächen bilden sich anschließend Schichten chemisch gefällter Substanzen im Submicron-Bereich, die eine Zementation an Partikelkontakten bewirken können (Touray, pers.Mitt.). Da diese Reaktionen vom Wassergehalt abhängen, ist das u.U. mit ein Grund dafür, daß wassergesättigte Blasentuffe besonders stark verfestigt sind.

7. Akkretionäre Lapilli aus anderen Gebieten

Akkretionäre Lapilli aus anderen Gebieten wurden zum Vergleich mit den Aggregaten des Laacher See Vulkans untersucht und mit Daten aus der Literatur verglichen (Tab. 7-1). Dabei ging es um folgende Fragen: (a) Gibt es generelle Unterschiede zu akkretionären Lapilli anderer Vulkane; (b) welchen Einfluß hat die chemische Zusammensetzung des Magmas; (c) die Größe der Aggregate > 1 cm; (d) eine Entfernung > 10 km vom Eruptionszentrum auf den Aufbau und die Kornverteilung in den Aggregaten und (e) welche Unterschiede gibt es zwischen akkretionären Lapilli aus der Eruptionssäule und deren windverdriftete Aschenwolke gegenüber solchen aus Bodentransportsystemen und deren Elutriationswolken.

Tabelle 7-1: Übersicht über die Proben der Vergleichsanalysen.
Table 7-1: Samples from other volcanoes.

Location	Deposit	Chemistry	Notes
Weiberner Tuff	Surge		
Tilos Kos-Plateau	Ignimbrite	Rhyolite	Extremely large up to 5 cm
Santorini	Surge		
Fossa di Vulcano	Surge	Trachyte	Extremely close to source, < 500 m
Monte Pelato, Lipari	Ignimbrite/ Surge	Rhyolite	
Vesuv (Eruption 79)	Surge	Phonolite	
Mount St.Helens	Blast-surge	Dacite	
Kilauea	?Fallout/ Surge	Basalt	
Wairakei Formation	Fallout	Rhyolite	Up to 3 cm in size Up to 140 km off source
Soufriere, St.Vincent	Eruption plume, Fallout	Andesite	Up to 35 km off source

7.1 Vorkommen, Aufbau und Granulometrie

In der folgenden Darstellung der Einzelergebnisse sind solche Beispiele herausgegriffen, in denen die akkretionären Lapilli entweder aufgrund ihres Vorkommens oder des Aufbaus besonders interessant sind.

7.1.1 Weiberner Tuff, Osteifel

Der Surge - Horizont I des Weiberner Tuffs (Riedener Vulkankomplex; Viereck, 1984) führt zwei unterschiedliche Typen akkretionärer Lapilli. Die untersuchte Ablagerung beginnt mit einem basalen, feinkörnigen Teil, der aus mehreren, rhythmisch geschichteten, normalgradierten Einzelschichten besteht. Im Hauptteil folgen grobe, trogförmig schräggeschichtete Breccien (Abb. 7-1).

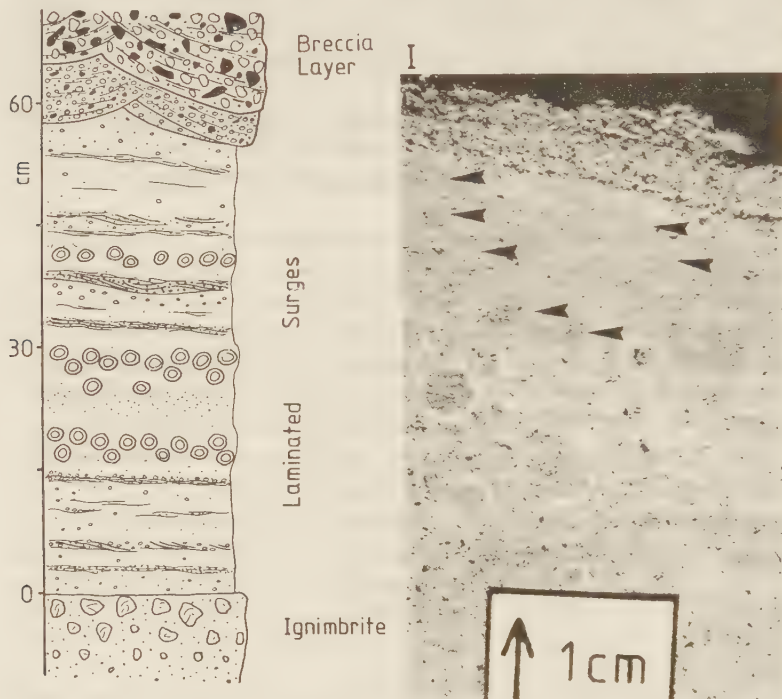


Abb. 7-1: Der untere, feinkörnige Teil des Surge - Horizontes I in den Weiberner Tuffen enthält drei lagenförmige Anreicherungen von R- und C-Typ Lapilli (Foto zeigt ein gesägtes Handstück).

Fig. 7-1: The lower, fine-grained part of surge deposit I of the Weiberner Tuff, East-Eifel. Accretionary lapilli occur in three distinct layers. Only R-lapilli with their fine-grained rims are visible in the field, but through careful handspecimen examination (close-up photograph) C-lapilli can be recognized.

Unterhalb der Breccien sind akkretionäre Lapilli in drei Lagen angereichert. Im Gelände erkennt man nur R-Typ Lapilli; gesägte Handstücke zeigen aber jeweils oberhalb der Rinden-Lapilli zusätzlich C-Typ Lapilli.

Die R-Typ Lapilli besitzen eine dünne, feinkörnige Rinde wie vergleichbare Aggregate der Laacher See Tephra. Trotz vollständiger Zeolithisierung der Weiberner Tephra ist in einigen akkretionären Lapilli das Gefüge erkennbar - locker, porös mit punktförmigen Partikelkontakten: D.h. sie gehören zum R(Fall)-Typ aus Surge-Wolken, wie er auch aus der Laacher See Tephra bekannt ist. Die C-Typ Lapilli sind blasenarm und zeigen randlich konzentrische Anlagerungsschalen.

(Korngrößenanalysen sind nicht möglich, da der Tuff durch Zeolithisierung zu Bausteinqualität verfestigt ist)

7.1.2 Kos-Plateau-Ignimbrit; Tilos, Griechenland

Auf der Insel Tilos in der östlichen Ägäis ist der 150000 Jahre alte Kos-Plateau-Ignimbrit in einer Mächtigkeit bis zu 30 m aufgeschlossen (Stadlbauer et al., 1986). Das submarine Eruptionszentrum wurde südlich von Kos lokalisiert, so daß die pyroklastischen Ströme weite Strecken über das Meer zurückgelegt haben müssen. Auf Tilos geht der Hauptteil des Ignimbrits nach oben in eine Segregationslage über, in der C-Typ Lapilli bis zu 5 cm (!) Größe vorkommen.

Die akkretionären Lapilli sind bis zu einer Größe von ca. 3 cm kugelig, darüber unregelmäßig elliptisch geformt. Tangential orientierte Rhyolithscherben und Glimmerplättchen lassen auch makroskopisch konzentrischen Schalenbau erkennen.

Von verschiedenen Bereichen der Mega-Lapilli wurden Korngrößenanalysen durchgeführt. Es gibt keine systematischen Unterschiede zwischen innerem Bereich und der Randzone. Die Kornverteilung ist bei 0.7 Gew.% > 0.35 mm begrenzt; sie ist unimodal mit einem Verteilungsmaximum bei 45 - 63 µm; der Median beträgt 45 µm, die Asche ist mäßig sortiert (Inman-Werte 1.8 - 1.9). Die Korngrößenverteilung > 0.5 mm der Matrix hat keinen Einfluß auf die Kornverteilung im Aggregat.

7.1.3 Äolische Inseln, Italien

(Fossa di Vulcano und Monte Pelato, Lipari)

Die Inselgruppe besteht aus sieben Inseln, die ausschließlich aus magmatischen Gesteinen aufgebaut werden. Altersdatierungen deuten auf den Beginn vulkanischer Aktivität vor ca. 1.2 Ma hin; die subaerische Phase begann vor ca. 0.5 Ma (Beccaluva et al., 1980; Gillot & Villari, 1981).

In der letzten Entwicklungsphase Liparis baute sich im Nordostteil der Insel der Monte Pelato aus rhyolithischen Eruptionen auf. Auf seiner Nordostflanke stehen zwischen gut sortierten Bimslapillischichten schlecht sortierte Ignimbrite und Surge-Ablagerungen mit akkretionären

Lapilli an. Der Vulkankegel der Fossa di Vulcano wird aus vier Eruptionsequenzen aufgebaut, die aus einer Wechselfolge von Surges, Ignimbriten und Fallout-Lapillischichten bestehen (Frazetta et al., 1983). Die jüngsten Ablagerungen der sogenannten Modernen Sequenz stammen von der phreatomagmatischen Eruption 1888 - 90. Laminierter geschichteter Surge-Ablagerungen auf der Innenseite des Gipfelkraters enthalten im oberen, aschenreichen Teil C-Typ akkretionäre Lapilli.

Die kugeligen, bis ca. 5 mm großen C-Typ Lapilli zeigen nur schwach ausgebildeten Schalenbau. Im Zentrum sind häufig grobkörnige Partikel $> 0.4 - 0.5$ mm als Agglomerationskeime zu erkennen. Die Korngrößenverteilung ist unimodal bis schwach bimodal. Das Verteilungsmaximum liegt bei $45 \mu\text{m}$. Die Kornverteilungskurve hat einen grobkörnigen Schwanz; die Obergrenze liegt oberhalb 1 mm Korngröße; Median etwa $45 \mu\text{m}$, Sortierung schlecht - Inman-Werte > 2 bis 2.8. Die Kornverteilung ist in den akkretionären Lapilli erst oberhalb $63 \mu\text{m}$ gegenüber der Matrix selektiert.

7.1.4 Mount St. Helens, USA

Die letzte große Eruptionsserie des Mount St. Helens begann am Morgen des 18. Mai 1980 nach einem Erdbeben, durch das die instabile Nordflanke des Vulkankegels zusammenbrach (Lipman & Mullineaux, 1981). Dieser Erdstocher druckentlastete den im Berg befindlichen Teil der Magmakammer (cryptodome), der daraufhin horizontal explodierte (directed blast) (Hoblitt et al., 1981; Moore & Sisson, 1981; Waitt, 1981). Die sich mit bis zu 200 m/sec ausbreitende Surge (Voight, 1981) verwüstete 550 km^2 Landschaft nördlich des Vulkans.

Die Ablagerungen der directed blast - surge sind normal gradiert, deren vertikale Korngrößenabnahme abnehmendes Strömungsregime widerspiegelt. Die feinkörnige Topasche, die accretionary lapilli unit, ist reich an C-Lapilli. Die Aggregate sind sowohl an deren Basis lagenförmig angereichert (blast-surge Lapilli), wie auch im Oberteil dieser Asche unregelmäßig verteilt (C(Fall)-Typ). Akkretionäre Lapilli wurden auch im Innern von Fahrzeugwracks gefunden (Hoblitt et al., 1981). Akkretionäre Lapilli, die in Aschenfallablagern der plinianischen Eruptionssäule bis 10er km vom Vulkan entfernt verbreitet sind, werden mit turbulenten Aschenwolken in Verbindung gebracht, die durch Elutriation aus pyroklastischen Strömen entstanden sind (Rowley et al.; Waitt und Dzurisin, 1981).

Die untersuchten blast surge Lapilli sind bis zu 5 mm groß. Gelegentlich bilden grobkörnige Partikel im Zentrum Agglomerationskeime. Die unregelmäßig im Schichtoberteil verbreiteten Lapilli sind bis zu 8 mm groß. Sie sind schwach konzentrisch aufgebaut und zeigen in kleinen Bereichen das lockere Gefüge mit punktförmigen Partikelkontakten. Die C-Typ Lapilli der Elutriationswolken sind bis zu 8 mm große Aggregate ohne sichtbare Besonderheiten.

Die unimodale bis schwach bimodale Korngrößenverteilung der blast surge Lapilli reicht bis > 0.5 mm. Akkretionäre Lapilli < 2 mm Durchmesser sind deutlich grobkörniger als größere Aggregate (Abb. 7-2).

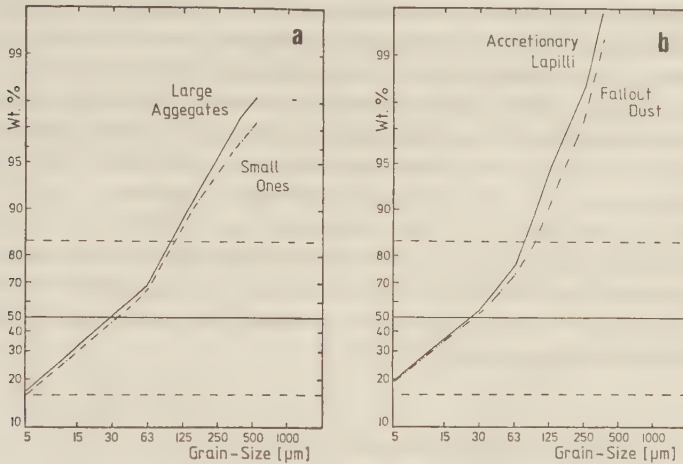


Abb. 7-2: Kornverteilung der Asche in akkretionären Lapilli der Mount St.Helens blast-surge: (a) Surge-Lapilli verschiedener Größe haben wie diejenigen der LST unterschiedliche Kornverteilung. (b) Akkretionäre Lapilli aus der "Elutriationswolke" der blast-surge (gestrichelt) und der Aschenmatrix (oberster cm der accretionary lapilli unit).

Fig. 7-2: Ash-size distribution of accretionary lapilli from the May 18, 1980 directed blast surge of Mount St.Helens: (a) Ash from surge-lapilli of different sizes. Similar to the LST, small accretionary lapilli are coarser grained than larger ones. (b) C-lapilli (stipled) and blast "elutriation ash" are similar in grain-size distribution except for a smaller > 250 µm in the aggregates, which causes the separation of the curves.

Die akkretionären Lapilli der feinaschenreichen Topzone sind signifikant feinkörniger - nur 0.5 Gew.% > 0.35 mm. Die Verteilung ist mit einem Minimum bei 45 µm Korngröße schwach bimodal, die Sortierung schlecht (Inman-Wert 2.1). Die akkretionären Lapilli haben nahezu die gleiche Korngrößenverteilung wie die Asche des obersten cm der Ablagerung. Das beweist wie schon in der Laacher See Tephra, daß Elutriationsaschenwolken ohne Korngröbenselektion agglomeriert werden.

7.1.5 Uwekahuna Asche - Kilauea, Hawaii

Hawaii ist die größte Insel der gleichnamigen Kette im Zentralpazifik. Die geringe Viskosität und der geringe Gasgehalt der dort eruptierenden basaltischen (tholeiitischen) Magmen läßt häufig Lavafontänen entstehen. Gelegentlich kommt es auch zu hochexplosiven, phreatomagmatischen Eruptionen, deren feinkörnige Asche weit verbreitet wird.

Der Kilauea eruptierte ca 2100 B.P. die Uwekahuna Asche mit einem Volumen von 0.2 km^3 (Lockwood & Rubin 1986). Pyroklastische Surges und windverdrifteter Fallout verbreiteten die Asche über mehr als 400 km^2 (15 cm - Isopache). Eine an akkretionären Lapilli reiche Aschenschicht wurde nach Dzurisin & Casadeval (1986) als Fallout abgelagert.

Die C-Typ Lapilli sind bis zu 4.5 mm groß, makroskopisch erkennt man nur ein dichtes Gefüge und einige wenige Blasen - nur 45 % der untersuchten Aggregate enthielten Blasen.

Die unimodale Korngrößenverteilung reicht bis 0.5 Gew.% > 0.5 mm, das Maximum liegt bei 45 μm ; die agglomerierte Asche ist gut sortiert (Inman-Wert 1.45). Eine Korngrößen Selektion gegenüber der Matrix setzt oberhalb 0.045 mm ein.

7.1.6 Wairakei Formation, Neuseeland

Die Tephra-Ablagerungen der ca 20000 Jahre alten Wairakei Formation sind um den Lake Taupo im Zentralteil der Nordinsel Neuseelands verbreitet (Self, 1983). Die phreatoplinianisch eruptierten Ablagerungen beginnen mit einem feinkörnigen Aschenfallout und enden mit den mehrere 10er m mächtigen Ignimbriten der Wairakei-Breccie. Zwischenzeitlich entstanden zwei an akkretionären Lapilli reiche Ablagerungen. Proximal erreichen die Aggregate eine Größe bis zu 4.5 cm; in 140 km Entfernung vom Eruptionszentrum sind sie noch bis zu 5 mm groß.

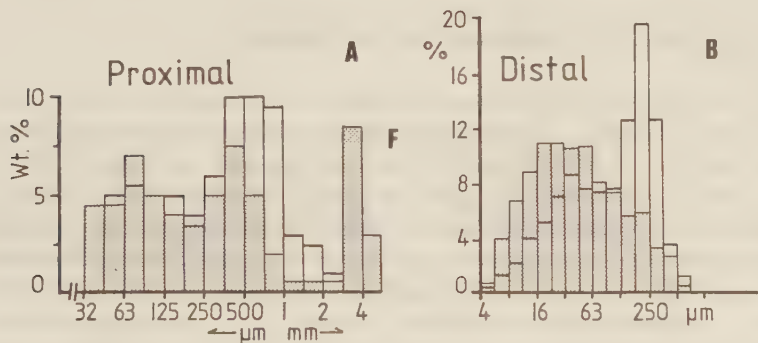
Die von mir untersuchten akkretionären Lapilli sind bis zu 3 cm groß. Sie sind sehr feinkörnig, ohne eigentlichen Kern; konzentrischer Schalenbau ist gut entwickelt; Blasen sind nicht zu erkennen.

Die unimodale bis schwach bimodale Korngrößenverteilung reicht bis 0.18 mm (0.6 - 0.7 Gew.%); das Verteilungsmaximum liegt bei 5 - 15 μm . Die agglomerierte Asche ist mäßig - schlecht sortiert (Inman-Werte 1.9 - 2). Systematische Unterschiede zwischen dem inneren Bereich und der Randzone der Aggregate gibt es nicht. Gegenüber der Matrix setzt in den Aggregaten bereits oberhalb 15 μm Korngröße eine schwache Selektion ein.

Self (1983) beschreibt aus der Wairakei Formation R-Typ Lapilli mit einem Korngrößenspektrum von 5.7 bzw. 4.1 Gew.% > 0.5 mm. Die Sortierung der agglomerierten Asche schwankt um Werte von 2 - 2.2).

7.1.7 Soufriere Vulkan, St.Vincent

In der Zeit von 13. bis 26. April 1979 brach der in der Karibik gelegene Vulkan Soufriere wiederholt in phreatoplinianischen Eruptionen aus (Shepherd et al., 1979). Akkretionäre Lapilli wurden zusammen mit Aschenfallout aus der Eruptionssäule während mindestens dreier Einzeleruptionen (13./14., 22. und 26. April) bis in 36 km Entfernung vom Eruptionszentrum abgelagert (Brazier et al., 1982; Sigurdsson, schriftl.Mitt.). Am 22. April fielen die Aschenaggregate mit einem begleitenden Regenfall, diejenigen der Eruption am 26. April waren trocken.



Observatorium, 10 km S' des Eruptionszentrums bis > 4 mm, in 36 km Entfernung nur noch bis 0.71 mm (Sigurdsson, schriftl.Mitt.) (Abb. 7-3).

In proximal verbreiteten akkretionären Lapilli sind grobkörnigere Partikel angereichert als im begleitenden Aschenfallout. Wahrscheinlich wirkten die groben Partikel als Agglomerationskeime, die feinkörnige Asche anlagern - das Verteilungsminimum deutet dies an (Abb. 7-3a). Trifft das zu, sind die Aggregate nicht nur im Aufbau denjenigen aus Surges ähnlich. Distale akkretionäre Lapilli agglomerieren nur den feinkörnigen Anteil der Aschenwolke. Das grobe Verteilungsmaximum des bimodalen Aschefallouts verursacht kein zweites Häufigkeitsmaximum in der Kornverteilung der akkretionären Lapilli.

7.2 Vergleich mit der Laacher See Tephra

Akkretionäre Lapilli aus pyroklastischen Strömen und Surges anderer Vulkangebiete besitzen generell die gleichen Eigenschaften wie die Aggregate der Laacher See Tephra. Der Internaufbau zeigt das gleiche dichte Partikelgefüge, der Schalenbau wird nach außen deutlicher, die Dicke der Rinde von Surge-Lapilli variiert innerhalb der gleichen Grenzen (Abb. 7-4). Flow-Lapilli des Monte Pelato und des Kos-Plateau-Ignimbrits haben ein Korngrößenspektrum ≤ 0.35 mm unabhängig von der extremen Größe der Mega-Lapilli (Abb. 7-5). Surge-Lapilli bilden sich häufig um grobkörnige Partikel, die als Agglomerationskeime im Zentrum der Aggregate sitzen. Das Kornverteilungsspektrum ist entsprechend breit - der grobe Schwanz der Verteilungskurven der Aggregate vom Monte Pelato, der Fossa di Vulcano und des Mount St. Helens ist ebenfalls schon aus der Laacher See Tephra bekannt. Extrem geringe Entfernung vom Eruptionszentrum spielt für den Aufbau und die Granulometrie der akkretionären Lapilli von Vulcano ebenso wenig eine Rolle wie basaltischer Chemismus (höhere Dichte der Partikel) der Aggregate der Uwekahuna-Asche (Hawaii): Trotz höherer Dichte des basaltischen Glases gegenüber phonolithischem oder rhyolithischem Glas ist das agglomerierte Kornspektrum nicht von anderen Aggregaten verschieden.

Akkretionäre Lapilli aus Elutriationswolken sind im Aufbau und der Kornverteilung ebenfalls mit der Laacher See Tephra identisch (Abb. 7-5); unter den Aggregaten der Vesuv Eruption 79 aus Pompeji sind z.B. auch R_{mult} -Lapilli.

Die von mir untersuchten akkretionären Lapilli der Wairakei Formation Neuseelands interpretiere ich als kernlose Lapilli: Die maximale Korngröße < 0.18 mm entspricht in der Laacher See Tephra der Kornverteilung im Mantel um akkretionäre Lapilli. Im Unterschied zu den Laacher See Aggregaten haben die der Wairakei Formation jedoch einen feineren, laminierten Schalenbau ohne makroskopisch sichtbaren grob-fein-Wechsel.

Die akkretionären Lapilli vom Top der accretionary lapilli unit des Mount St. Helens blasts sind nach ihrer stratigraphischen Stellung und Korngrößenverteilung Fall-Lapilli aus der Elutriationswolke. Im Gegensatz zum entsprechenden Aggregat-Typ am Laacher See haben sie

aber nur punktuell das lockere Partikelgefüge entwickelt. Der angedeutete Schalenbau mit dichtem Partikelgefüge scheint allgemein auf ein höheres Strömungsregime hinzudeuten.

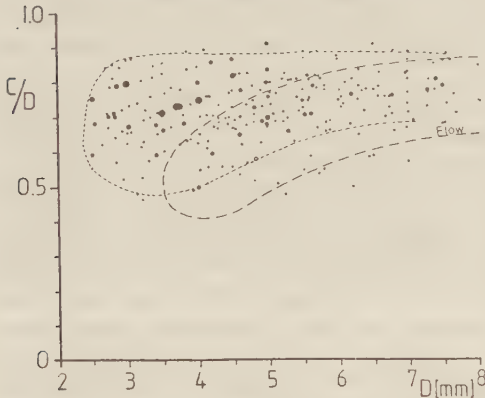


Abb. 7-4: Rindendicke (C/D) gegen D der Surge-Lapilli des Weiberner Tuffs und von Santorini. Die Meßwerte fallen bis auf wenige Ausnahmen in das Feld der Surge-Lapilli der Laacher See Tephra (gepunktet umrandet).

Fig. 7-4: Proportional thickness of fine-grained rim (C/D) versus D of accretionary lapilli from surges of the Weibern Tuff and from Santorini. Data generally fit the variation area of surge-lapilli of the Laacher See Tephra (dotted line).

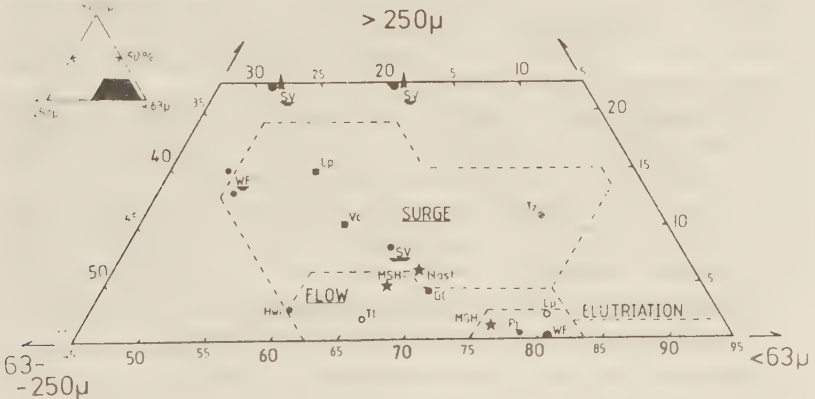


Abb. 7-5: Ternäres Kornverteilungsdiagramm der Asche in akkretionären Lapilli anderer Vulkane. Die Datenpunkte der untersuchten akkretionären Lapilli fallen sämtlich in das entsprechende Variationsfeld der LST-Aggregate. SV = Soufriere Vulkan; WF = Wairakei Formation; MSH = Mount St. Helens; Hwi = Hawaii; Tz, Pj = Terzigno, Pompeji - Vesuv 79 AD; Tl = Tilos; Lp, Vc = Lipari, Vulcano, Äolische Inseln.

● Ignimbrite; ■ Surges; ● Elutriation

Fig. 7-5: Ternary ash-size variation of accretionary lapilli from several other volcanoes. Data match well the corresponding variation areas of LST-accretionary lapilli. This match suggests that grain-size variation within accretionary lapilli depends on factors such as mode of tephra transport, transport capacity, and particle binding forces, and is only moderately affected by the initial grain-size distribution of erupted ash.

Akkretionäre Lapilli aus der Eruptionssäule des Soufriere Vulkans sind nach ihrem internen Aufbau und der Kornverteilung Surge-Typ Lapilli (Abb. 7-5): D.h. es sind Aggregate aus polydispersen Systemen mit hoher Ausbreitungsgeschwindigkeit. In diesem speziellen Fall bedeutet das vertikaler, konvektiver Auftrieb mit mehr als 30 m/sec. Demnach können auch die von Self (1983) analysierten akkretionären Lapilli der Wairakei Formation in der Eruptionswolke gebildet worden sein. Die Entstehung von akkretionären Lapilli in Eruptionswolken diskutiere ich im folgenden Kapitel.

Schlußfolgerungen

Der Vergleich der akkretionären Lapilli aus anderen Vulkangebieten mit denjenigen des Laacher See Vulkans läßt sich folgendermaßen zusammenfassen:

- (a) Es gibt keine systematischen Unterschiede in Aufbau und Granulometrie zwischen den von mir untersuchten Flow- und Surge-Lapilli des Laacher Sees und akkretionären Lapilli anderer Vulkane.
- (b) Weder extreme Aggregatgröße (Kos-Plateau-Ignimbrit), extreme Nähe zum Eruptionszentrum (Vulcano), noch die chemische Zusammensetzung (Rhyolithe oder Basalte), die die Partikeldichte mitbestimmt, spielen eine Rolle.
- (c) Akkretionäre Lapilli aus Eruptionssäulen sind ähnlich aufgebaut wie akkretionäre Lapilli aus Surges: Beides sind Systeme mit hoher Transportenergie und hoher Geschwindigkeit - Surges durch horizontales Moment, Eruptionssäulen durch vertikale Konvektion.

Aus den Vergleichen mit Aggregaten anderer Vulkane leitet sich die Folgerung ab, daß die Bildung akkretionärer Lapilli nur von physikalischen Parametern wie Korngrößenverteilung, Transportkapazität, Strömungsenergie und Turbulenz, sowie von der Haftkraftverteilung und deren Stärke (Elektrostatik, Kapillarkräfte) bei der Agglomeration abhängt. Unter gleichen oder sehr ähnlichen Randbedingungen entstehen daher auch ähnliche Aggregate.

8. Aschenaggregate in plinianischen Eruptionswolken

8.1 Aggregatbildung

In plinianischen Eruptionswolken können sich Aschenaggregate als ash cluster durch elektrostatische Anlagerung geladener Partikel bilden (Sorem, 1982; Rose & Hoffman, 1982). Wahrscheinlich ist es eine Agglomeration durch Zusammenstoß der Partikel, die von elektrostatischen Kräften unterstützt wird. Akkretionäre Lapilli sind allerdings nur aus phreatoplinianischen Eruptionswolken beschrieben, sofern sie eindeutig aus der Eruptionswolke abzuleiten sind (Brazier et al., 1982; Self, 1983; Hayakawa, 1983; 1986).

Während der phreatoplinianischen Eruption des Soufriere Vulkans im April 1979 bildeten sich akkretionäre Lapilli in verschiedenen Eruptionsphasen (Brazier et al., 1982; Sigurdsson, schriftl. Mitt.). Korngrößenanalysen lassen darauf schließen, daß die Aggregate sowohl in der Eruptionssäule über dem Vulkan wie auch in der vom Wind verdrifteten Aschenwolke gebildet wurden. Die Massenkonzentration in der oberen Region der Eruptionssäule vom 26. April 1979 kann nach Daten von Brazier et al. (1982) und Sparks & Wilson (1982) überschlägig zu ca. 11 g/m^3 abgeschätzt werden. Vorausgesetzt, die Korngrößenverteilung entspricht schlotnah abgelagerten akkretionären Lapilli (vgl. Kap. 6.3.2), so ergibt sich ein mittlerer Partikelabstand von ca. 1 mm für die Fraktion $< 30 \text{ }\mu\text{m}$ (wie $15 \text{ }\mu\text{m}$ modelliert). Bei einer maximalen Korngröße von 4 mm bzw. ca. 12 Gew.% $> 1 \text{ mm}$ ist spontane Aggregatbildung möglich, da sich die maximale Korngröße im Bereich mittlerer Partikelabstände der feinen Aschenfraktion bewegt. Starke konvektive Turbulenz in der Eruptionswolke führt zu Stoßagglomeration der Partikel, so daß schließlich konzentrische Aggregate entstehen.

In den Ablagerungen sind grobkörnige Partikel $> 2 \text{ mm}$ in größerer Entfernung vom Eruptionszentrum verbreitet, wenn sie zuvor in akkretionären Lapilli agglomeriert wurden. Man könnte daraus schließen, daß die akkretionären Lapilli wie in Elutriationswolken über ein Vorstadium eines ungeordneten ash clusters gebildet wurden. Dem steht aber entgegen, daß akkretionäre Lapilli aus Eruptionssäulen sind nach ihrem Aufbau Surge-Lapilli mit groben Kernen ähneln (Brazier et al., 1982). So entstehen sie wahrscheinlich auch nach ähnlichen Prinzipien wie Surge-Lapilli.

In der Eruptionssäule betrug die mittlere Auftriebsgeschwindigkeit 25 - 30 m/sec. Es erscheint bei solchen Geschwindigkeiten einer polydispersen Aschenwolke plausibel, daß die Partikel $> 1 \text{ mm}$ während der Aggregatbildung Agglomerationskeime in der Zwei-Phasen-Strömung bilden. An die groben Keime wird anschließend feinkörnige Asche angelagert. Während die Aschenwolke nach Süden abdriftete, entstanden weitere akkretionäre Lapilli, die u.a. auf der Insel Bequia in 36 km Entfernung abgelagert wurden. Die Agglomeration erfolgte offenbar nicht nach dem Einsammelprinzip durch grobkörnige Partikel wie in der distalen Elutriationsaschenwolke östlich des Laacher Sees, denn die Aggregate bestehen überwiegend aus dem feinkörnigen Anteil des Fallouts. Das grobkörnige Verteilungsmaximum hat kaum Einfluß auf die Kornverteilung. Wahrscheinlich bildeten sich die akkretionären Lapilli durch

Zusammenstoß und Verdichten feuchter ash cluster und einiger Einzelkörner in den Windböen der 10 - 15 m/sec schnellen Luftströmung (Abb. 8-1): Die Kornverteilungscharakteristika der akkretionären Lapilli sind nämlich der Verteilung künstlicher ash cluster ähnlich, nur zum Größeren verschoben. Das aber kann leicht mit den größeren Haftkräften von Fluidbrücken erklärt werden, die sich in phreatoplinianischen Wolken bilden können.

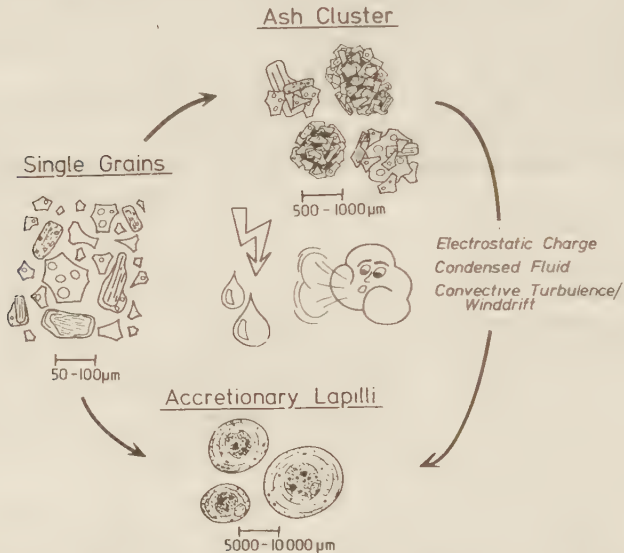


Abb. 8-1: In Eruptionswolken bilden sich akkretionäre Lapilli wahrscheinlich durch ähnliche Mechanismen wie in Elutriationswolken, nämlich durch Stoßkontakt elektrostatisch geladener Aschenpartikel. Zumindest in der vom Wind verdrifteten Aschenwolke scheinen sie sich über ein Vorstadium des ash clusters zu bilden.

Fig. 8-1: Accretionary lapilli form in phreatomagmatic eruption plumes by collision contact of charged particles around large grains, similar to surges. In winddrifted eruption clouds accretionary lapilli probably form by processes similar to those in elutriation clouds, i.e. by agglomeration of ash clusters which have previously formed. Formation of accretionary lapilli in low-concentration ash clouds ($< 3 - 4 \text{ g/m}^3$) seems possible only when a large proportion of condensed water forms strong fluid bonds between particles.

Akkretionäre Lapilli sind möglicherweise doch in der Eruptionssäule der Mount St. Helens Eruption am 18. Mai 1980 entstanden. Die nach Rowley et al. (1981) aus Elutriationswolken pyroklastischer Ströme stammenden akkretionären Lapilli sind in der Kornverteilung mit den C(Surge)-Lapilli des directed blast identisch, nicht mit den C(Fall)-Lapilli der Blast-Elutriation

(Abb. 8-2). Theoretisch können sie in der Eruptionssäule während der ash cluster - Bildung entstanden sein. Selbst bei geringer Massenkonzentration in der Aschenwolke kann die turbulente Konvektion mit mehr als 40 m/sec ausreichend Partikelkontakte herbeigeführt haben, so daß ein geordnetes Aggregat entsteht. Die akkretionären Lapilli agglomerierten aber nur den feinkörnigen Anteil aus der Wolke. Demnach waren die Kapillarkräfte kondensierter Fluide in einer Eruption ohne ausgesprochen phreatischen Einfluß zu gering, um Asche an grobe Keime oder um überhaupt grobe Asche anzulagern, so daß nur ash cluster verdichtet wurden (s.u.). Während der späteren Ausbreitung der Aschenwolke scheinen keine akkretionären Lapilli mehr gebildet worden zu sein, denn sie fehlen bereits in medialen Aschenfallablagerungen. Die Massenkonzentration im Zentrum der driftenden Aschenwolke betrug nach der Intensität der Wetterradarechos, mit dem der Driftweg der Aschenwolke verfolgt wurde, 3.4 g/m^3 (Harris et al., 1981; Harris & Rose, 1983). Zum Zeitpunkt der Radarmessung war der größte Teil der feinkörnigen Asche bereits zu ash clustern von 0.2 - 0.5 mm Größe agglomeriert, so daß für die Bildung der akkretionären Lapilli nicht der Einzelkornabstand, sondern der größere Abstand der cluster zueinander maßgeblich wird.

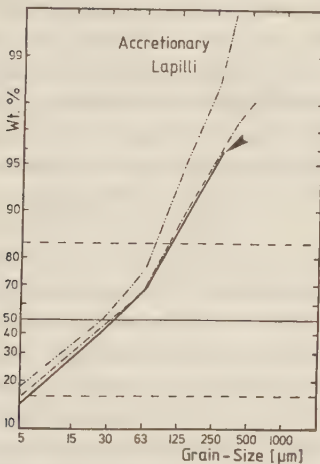


Abb. 8-2: Kornverteilung der Asche in akkretionären Lapilli, die möglicherweise aus der Eruptionswolke der Mount St. Helens Eruption vom 18. Mai 1980 stammen (fette Linie mit Pfeil). Die Kornverteilung ist mit der von Aggregaten der vorangegangenen blast-surge Explosion verglichen. — — — "blast-elutriation"; — · — · — blast surge.

Fig. 8-2: Grain-size distribution of accretionary lapilli from the May 1980 Mount St. Helens deposits perhaps formed within the eruption cloud (distribution curve indicated by arrow). The ash-size distribution of these aggregates is similar to those of the directed blast surge (— · — · —), but they differ from those of the "blast elutriation cloud" (— — —).

Ash cluster als ungeordnete, flockenförmige Aggregate können in Aschenwolken offenbar auch bei niedrigeren Partikelkonzentrationen und geringerem Feuchtigkeitsgehalt gebildet werden. Vergleicht man Aschenkonzentration und Feuchtigkeitsgehalt in den Wolken der

phreatoplinianischen Soufriere und der rein plinianischen Mount St. Helens Eruption miteinander, so liegt der Schluß nahe, daß ash cluster eher für nichtphreatische Eruptionen typisch sind. Zwar bilden sich die cluster auch nur bei Zusammenstoß der Partikel, dessen Hauptursache Turbulenzen sind, doch bewirken unzureichende Kapillarkräfte eine ungleich stärkere Korngröbenselektion der angelagerten Partikel. Elektrostatische Felder in der Eruptionswolke und geladene Aschenpartikel unterstützen Aggregatbildung, indem sie die Stoßwahrscheinlichkeit erhöhen (Paluch, 1970). Partikel müssen sich in einer niedrig konzentrierten Wolke viel häufiger über eine gewisse Entfernung hinweg gegenseitig einfangen als in hochkonzentrierten Wolken. Das führt dazu, daß nur feinkörnige Partikel eingefangen und angelagert werden, deren Sinkgeschwindigkeit nicht zu groß ist und deren Masse die Haftkräfte nicht übersteigt. Als Hauptbildungszeitpunkt kommt das Stadium konvektierender Eruptionssäule in Betracht, wenn sich der mittlere Partikelabstand sehr feinkörniger Asche im Bereich der Korngröße gröbere Partikel bewegt. In diesem Stadium kann sich feinkörnige Asche sowohl an grobe Körner anlagern als auch untereinander binden.

In den Aschenwolken kommt es, nach den experimentellen Beobachtungen zu urteilen, zur Bildung einer Vielzahl unterschiedlicher ash cluster, die zwei Grundtypen zugeordnet werden können (Abb. 8-1; vgl. Kap. 6-3): (a) Einzelkörner - das sind cluster ausschließlich aus einem oder wenigen relativ grobkörnigen Partikeln, an denen feinkörnigere Aschenteilchen anhaften. (b) cluster, die ausschließlich aus relativ feinkörniger Asche aufgebaut sind. Sorem (1982) fand in den untersuchten clustern der Mount St. Helens Eruption hauptsächlich Asche $< 40 \mu\text{m}$. Seine Beobachtung stimmt weitgehend mit den experimentellen Ergebnissen überein: In künstlichen ash clustern, die an der Platte angelagert wurden, ist feinkörnige Asche $< 45 \mu\text{m}$ gegenüber der Ausgangsverteilung stark angereichert.

Elektrostatische Anlagerung bewirkt, daß sich die Partikel nur mit den Punkten gegenpoliger Ladung berühren. Daraus resultiert der lockere Aufbau der ash cluster. Für längerfristige Haftung der Partikel sind zwar Kapillarkräfte notwendig, doch dürften in nichtphreatischen Wolken nur dünne Fluidfilme auf den Partikeln entstehen. Das verhindert, neben gegenseitiger Stütze durch andere Teilchen, die Einregelung der Partikel in dichtere Packung, da nach Menold (1986) bei nur geringer Benetzung starre Aggregate entstehen sollten. Außerdem wird durch unzulängliche Haftkräfte verhindert, daß sich weitere Partikel (größer als $45 \mu\text{m}$?) und andere cluster anlagern. Gerade das scheint aber zur Bildung akkretionärer Lapilli in der distalen Aschenwolke der Soufriere Eruption geführt zu haben. Bedingt durch die unzulänglichen Kapillarkräfte auf der einen und die schwachen elektrostatischen Kräfte auf der anderen Seite kommt es zu keiner weiteren Aufbauagglomeration, grobe Einzelkörner und ash cluster bleiben separat erhalten. Wahrscheinlich spielt auch der gegenüber Einzelpartikeln größere Aggregatabstand eine wichtige Rolle. Akkretionäre Lapilli entstanden in der Elutriationsaschenwolke am Laacher See wahrscheinlich nur aufgrund einer höheren Massenkonzentration.

Schlußfolgerung

Akkretionäre Lapilli sollten nach der vorangegangenen Diskussion häufiger in phreatischen (phreatomagmatischen/-plinianischen) Eruptionswolken entstehen, als in nichtphreatischen. Für rein plinianische Eruptionswolken ist demnach das ungeordnete ash cluster die typische Aggregatform. Das schließt aber akkretionäre Lapilli-Bildung in sehr stark turbulenten Wolken nicht von vornherein aus.

Akkretionäre Lapilli bilden sich in der Eruptionssäule ähnlich wie in Surges um grobkörnige Keime. Später werden wahrscheinlich in der windverdrifteten Aschenwolke bereits gebildete ash cluster durch Aufbauagglomeration zu akkretionären Lapilli verdichtet. Grobkörnige Partikel haben nur wenig Einfluß auf die Kornverteilung und die Agglomeration, weil die Verwirbelung der Asche durch Strömungsturbulenz vermutlich zu gering ist, um die groben Körner als Keime wirken zu lassen.

Ash cluster bilden sich entweder durch Anlagerung weniger feinkörniger Aschenteilchen an grobe Partikel, oder durch Agglomeration feinkörniger Asche untereinander. Beide an sich gegensätzlichen Formen bleiben in der Aschenwolke erhalten, weil weitere Aufbauagglomeration nicht stattfindet.

8.2. Aggregatsedimentation

Die Korngrößenverteilung des Aschenfallouts verschiedener explosiver Vulkaneruptionen - Soufriere 1979; Mount St.Helens 1980; Tambora 1815 (Sigurdsson & Carey, in Vorb.); Laacher See Vulkan 11000 BP (Bogaard, 1983) - zeigt in allen Fällen gleiche, oder sehr ähnliche Verteilungscharakteristika (Abb. 8-3): Der proximale Fallout ist grobkörnig, die Verteilung ist unimodal, die Kurve hat einen langgezogenen, feinkörnigen Schwanz. Mit zunehmender Transportweite bildet sich im medialen Fallout im Korngrößenbereich des feinen Schwanzes ein zweites Verteilungsmaximum. Die Falloutasche hat bimodale Kornverteilung mit einem markanten Verteilungsminimum zwischen 45 und 63 μm . Im distalen Fallout verschwindet das grobe Verteilungsmaximum. Die Kornverteilung ist wiederum unimodal; sie bleibt außerdem noch über große Strecken der Verbreitung weitgehend unverändert.

Diese Charakteristika sind je nach Stärke der Vulkaneruption, Höhe der Eruptionssäule und der Windgeschwindigkeit der Abdrift in unterschiedlicher Entfernung vom Eruptionszentrum ausgebildet. Die Häufigkeit dieser Merkmale in Falloutaschen kann nicht zufällig sein, zumal sie mit den experimentellen Ergebnissen übereinstimmen.

Während der Sedimentation aus der Aschenwolke fallen alle Partikel mit der ihnen eigenen Sinkgeschwindigkeit, die durch ihre Masse und ihren Luftwiderstand bestimmt ist - grobkörnige sedimentieren schneller als feinkörnige Partikel. Aus dieser Sicht ist auch das ash cluster, das aus vielen feinkörnigen Aschenteilchen zusammengesetzt ist, ein einziges Partikel. Es ist ein Sedimentationskörper, in dem alle agglomerierten Einzelpartikel mit aggregatspezifischer

Sinkgeschwindigkeit sedimentieren. Carey & Sigurdsson (1982) legten bei der Simulation des Aschenfallouts der Mount St.Helens Eruption eine Sinkgeschwindigkeit von 35 cm/sec zugrunde. Der Wert entspricht grob der Sinkgeschwindigkeit von 90 μm großen Einzelkörnern (hydraulische Äquivalenz der beiden). Bei den Einzelkörnern mit anhaftenden Aschenteilen dominiert noch die Sinkgeschwindigkeit des/der größten Körner, da der Luftwiderstand durch die anhaftende Feinasche nicht signifikant erhöht wurde. Man kann daher den Begriff Einzelkorn beibehalten.

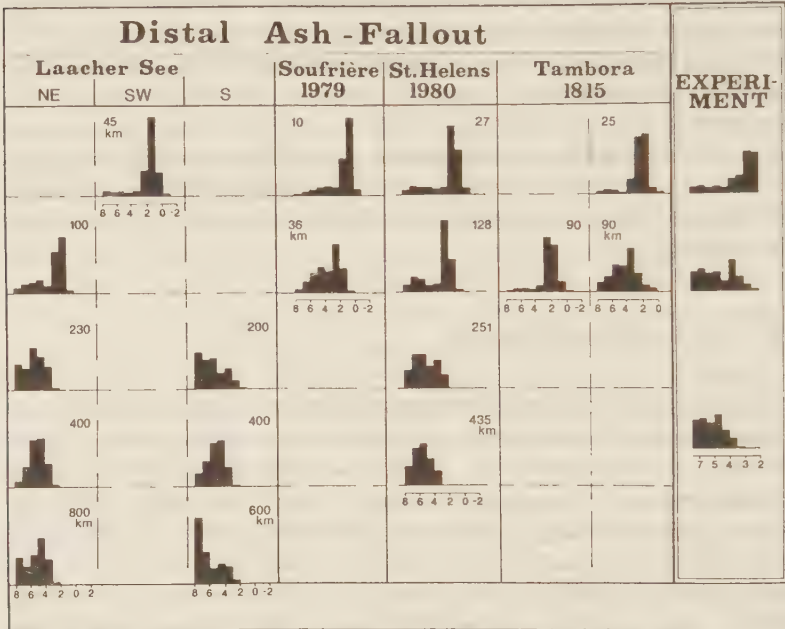


Abb. 8-3: Kornverteilung distaler Falloutasche verschiedener explosiver Vulkaneruptionen. Die Abbildung zeigt jeweils identische Verteilungscharakteristika im proximalen, medialen und distalen Fallout, die außerdem mit den Charakteristika des künstlichen Sedimentes übereinstimmen. Daten: Laacher See (Bogaard, 1983); Soufrière (Brazier et al, 1982); Mount St.Helens (Carey & Sigurdsson, 1982); Tambora (Sigurdsson & Carey, in Vorb.).

Fig. 8-3: Grain-size distribution of fallout ash of different explosive eruptions. Distribution patterns of proximal, medial, and distal fallout do not only correspond to each other, but also to the principal characteristics of the artificial deposit of the experiments, suggesting aggregate deposition of ash during these eruptions. These examples indicate that aggregate deposition of fine ash is more frequent than previously

thought - eventually it may be found that it is the typical style of fine-grained ash deposition from drifting ash clouds. References: Laacher See (Bogaard, 1983); Soufriere (Brazier et al., 1982); Mount St. Helens (Carey & Sigurdsson, 1982); Tambora (Sigurdsson & Carey, in prepn.).

Die Abdrift der Aschenwolke führt zu einer Korngrößenfraktionierung durch Windsichtung von groben Einzelkörnern, die schneller fallen und von feinkörniger Asche in den ash clustern, die leichter verdriftet werden. Daraus läßt sich eine Reihe von Schlußfolgerungen ziehen:

(1) Vergleicht man die Sinkgeschwindigkeiten der Einzelpartikel unterschiedlicher Korngröße miteinander, so wird deutlich, daß die feinkörnige Asche des proximalen Fallouts an den groben Partikeln haften müssen. Denn wären die feinkörnigen Teilchen als Einzelkörner sedimentiert, so wie es das traditionelle Modell vorsieht, wären sie 100e km weiter transportiert worden. Die Kopplung beider Kornfraktionen verursacht im proximalen Fallout den feinkörnigen Schwanz der Verteilungskurve (Abb. 8-4).

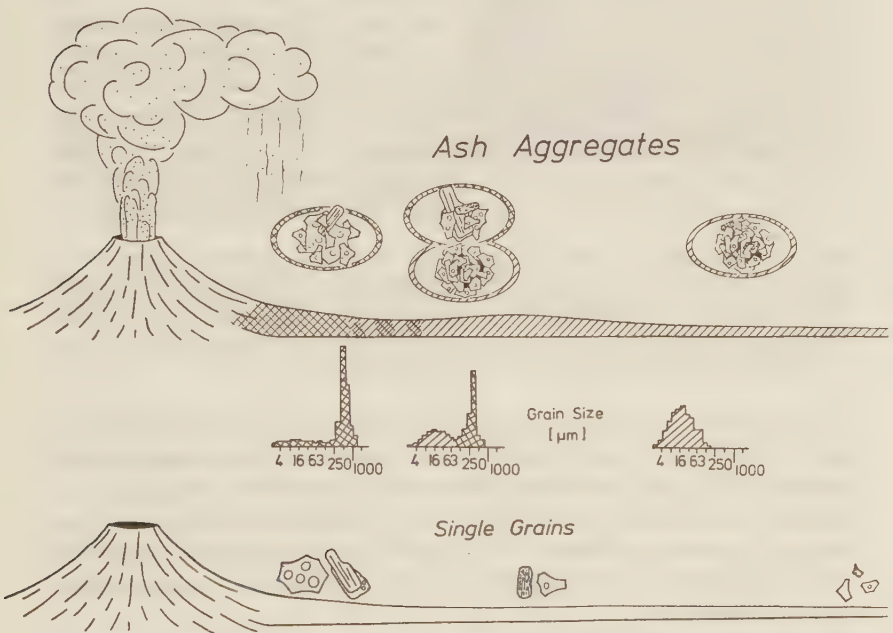


Abb. 8-4: Ablagerungsmodell feinkörniger Asche als Aggregate und als Einzelkörner.

Fig. 8-4: Depositional model of ash aggregates versus single grains. If fine-grained ash is deposited as clusters, generally poorly sorted fallout deposits are formed, because no grain-size fractionation between particles occurs. The typical grain-size distribution pattern of a deposit formed by clusters is exemplified by the distribution histograms of the May 18, 1980 Mount St. Helens ash fall.

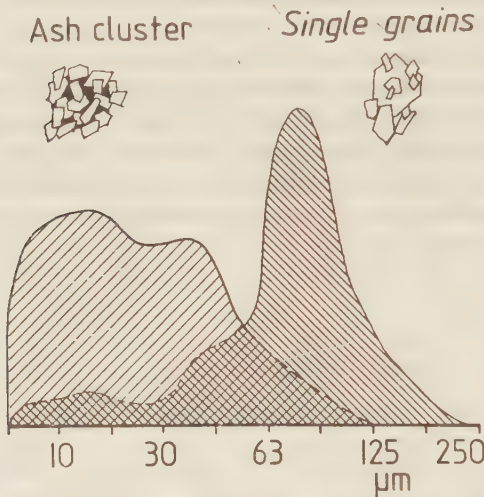


Abb. 8-5: Darstellung der bimodalen Kornverteilung medialer Falloutasche als zusammengesetztes Sediment aus vorwiegend feinkörnigen ash clustern und groben Einzelkörnern mit anhaftender Feinasche.

Fig. 8-5: Bimodal grain-size distribution of medial fallout ash shown as a composite deposit. The distribution minimum at 45 - 63 μm is an artifact of the final deposit being composed of fine-grained clusters and coarse simple grains. Deposition at the same site implies either hydraulic equivalence of clusters and grains or, more likely in this case that both components come from different altitudes of the drifting ash cloud.

(2) Größere Partikel, die in ash clustern agglomeriert sind, gelangen in größere Entfernung als das Einzelkorn, da ihre Sinkgeschwindigkeit im cluster reduziert ist. Im Aschenfallout der Mount St. Helens Eruption wurden noch in 435 km Entfernung 0.18 mm große Partikel abgelagert, - als Einzelkörner sedimentierten sie bereits in 210 - 250 km Entfernung. Nach den experimentellen Untersuchungen ist der Aschenfall in > 400 km Entfernung das reine ash cluster-Kornspektrum, denn 0.18 mm große Partikel wurden zusammen mit feinkörniger Asche als künstliche Aggregate an der Platte angelagert.

(3) Die Bildung von Aschenaggregaten verhindert eine Korngrößenfraktionierung in Einzelfractionen durch Transportsortierung, da alle Partikel des Aggregats miteinander gekoppelt sedimentieren. Dadurch entsteht ein distaler Aschenfallout, dessen Kornverteilung über weite Strecken der Verbreitung relativ unverändert bleibt.

(4) In einem bestimmten Entfernungsbereich kann eine größere Aschenmenge akkumuliert werden als durch Einzelkornsedimentation, da eine weitere Fraktionierung innerhalb des agglomerierten Korngrößenspektrums unterbleibt. Daraus erklärt sich wiederansteigende Schichtmächtigkeit etwa 300 km östlich des Mount St. Helens (Sarna-Wojcicki et al., 1981; Carey & Sigurdsson, 1982).

(5) Der Aschenfallout mit bimodaler Kornverteilung medialer Fazies ist ein zusammengesetztes Sediment aus beiden Komponenten - groben Einzelkörnern und ash clustern, die am gleichen Ort sedimentierten. Das markante Verteilungsminimum zwischen 45 und 63 μm erscheint erst in der Ablagerung, es existiert in den Aggregaten nicht. Das Minimum markiert auch im Sediment die Grenze zweier Korngrößengebiete: Die Fraktion < 45 μm als die ash cluster - Bildner, die Fraktion > 45 μm , die entweder Feinasche anlagert und wie ein Einzelkorn sedimentiert, oder bis zu 0.18 mm passiv in andere cluster eingebaut wird. Die Überlagerung in der Sedimentation erzeugt das Minimum im Sediment (Abb. 8-5).

Das hier vorgestellte Modell der Aggregatsedimentation erklärt viele Charakteristika des Aschenfallouts aus plinianischen Eruptionswolken, nicht nur der Mount St. Helens Eruption 1980. Allgemein betrachtet ist Aggregatsedimentation wahrscheinlich wesentlich häufiger als bislang vermutet wurde. Wahrscheinlich ist es die normale Form der Sedimentation aus windverdrifteten Aschenwolken, die sich bei detaillierter Arbeitsweise anhand der oben diskutierten Merkmale auch anderswo nachweisen läßt. Ich möchte hier sogar prognostizieren, daß sie später einmal das bisherige Modell der Einzelkornsedimentation ablösen wird bzw. beide Modelle gleichwertig - d.h. für die Aggregatsedimentation ohne den Charakter des exotischen - nebeneinanderstehen.

9. Akkretionäre Lapilli als Indikatoren vulkaniklastischer Ablagerungen

9.1 Identifikationsschema

Die Untersuchungsergebnisse erlauben die Zuordnung akkretionärer Lapilli zu bestimmten Transportsystemen. Die Unterscheidung in C- und R-Typ ist für diese Zuordnung nicht immer interessant, auch wenn dieses Merkmal besonders hervortritt. Beide Typen können nämlich in einem Transportsystem nebeneinander vorkommen, außerdem entwickelt sich der C-Typ in distalen Ablagerungen aus dem R-Typ. Eine Aussage relativer Entfernung vom Eruptionszentrum ist in Bodentransportsystemen möglich. In der folgenden Übersicht wird meist nur zwischen Fallout und Bodentransport unterschieden; Flows und Surges sind hier Untergruppen des Bodentransports.

Die folgende Zusammenstellung führt die wichtigsten Unterscheidungsmerkmale auf, die eine Ansprache akkretionärer Lapilli ermöglichen sollen:

Feinkörnige Rinde

Interpretation: Proximale Bodentransportsysteme oder Fallout aus Aschen-(Elutriations)-Wolken

Aufbau der Rinde

Interpretation: Unterscheidet Bodentransport von windverdriftetem Fallout (auch Fallout aus Elutriationswolken)

- (a) gradiert Rinde, dann keine Aussage möglich;
- (b) Multiple Rinde mit diskontinuierlichen Schalen oder Nur-Rinden-Lapillus (ausschl. Rindenschalen), dann Fallout aus passiv verdrifteten Wolken, Elutriationswolken über Bodentransport eingeschlossen

Dicke der Rinde

Interpretation: Unterscheidet den Flow- vom Surge-Typ

- (a) hohes Verhältnis C/D, dann R(Surge)-Typ;
- (b) niedriges Verhältnis C/D, dann R(Flow)-Typ

(Zur Unterscheidung sollten nur Aggregate bis 5 mm Größe gemessen werden, da sich bei größeren Aggregaten beide Punktwolken überlagern)

Elliptischer Lapillus / Kern

Interpretation: Bodentransportsysteme, meist Flows;

aber auch Elutriations-/Deflationswolken im Stadium ihrer Entstehung, wenn der konvektive Auftrieb noch sehr stark ist und die Aggregate dabei rotiert werden.

Blasen im Aggregat

Interpretation: Unterscheidet heiße, trockene von warmen, nassen Transportsystemen

- (a) blasenreich - um 80% der Lapilli einer Probe mit Blasen, dann heiße Wolken;
- (b) blasenarm - um 40% der Lapilli einer Probe mit Blasen, dann warme Wolken aus Eruptionen mit phreatischem Einfluß

Partikelgefüge

Interpretation: Unterscheidet Bodentransport (Eruptionssäule) von Fallout passiv verdrifteter Aschen-/Elutriationswolken

- (a) Gefüge dicht mit flächenförmigen Kontakten, dann Bodentransportsysteme und Eruptionssäule
- (b) Gefüge locker mit punktförmigen Kontakten, dann Aggregate aus passiv verdrifteten Wolken (niedrigere Strömungsenergie; elektrostatische Anlagerung)

Grobkörnige Partikel ≥ 0.5 mm im Kern

Interpretation:

- (a) Als Aggregatkeim im Zentrum, dann Transportsystem mit hoher Strömungsgeschwindigkeit wie horizontale Surges und vertikale Eruptionssäulen
- (b) Auch tangential im Kern, dann nasse Transportsysteme, distale Surges und Bodenwolken von Eruptionen mit phreatischem Einfluß

Korngrößenverteilung:

Interpretation: Ermöglicht Unterscheidung von Fall, Flow und Surge;

- (a) schlecht sortiert mit Obergrenze > 0.5 mm, dann Systeme mit hoher Strömungsgeschwindigkeit - Surges und Eruptionssäule, aber auch nasse Flows bei phreatischem Einfluß (s. Gefüge!);
- (b) mäßig sortiert mit Obergrenze um 0.35 (-0.5) mm, dann Flows, da Elutriation das Material vorsortiert;
- (c) mäßig sortiert mit Obergrenze um 0.25 (-0.35) mm, dann Fallout syngentisch zum Bodentransport, wenn konvektiver Auftrieb in der Wolke das Kornspektrum weiter eingengt hat, oder distale Eruptionswolke

9.2 Interpretation der Aggregatführung einer Tephraschicht

Eruptionswolken

Akkretionäre Lapilli entstehen nach den vorliegenden Untersuchungen ausschließlich subaerisch. Es scheint, sie sind auch nur bei subaerischer Ablagerung erhaltungsfähig, da Eintauchen unmittelbar nach der Bildung ohne vorherige Verfestigung zum Wegfall der Kapillarkräfte zwischen den Partikeln führt. Die Vorkommen aus aquatischen Ablagerungen müssen daher als Umlagerungen der Aggregate interpretiert werden (Fisk, 1963; Bateson, 1965; Nelke & Pätzold, 1981; Heinrichs, 1984; Viereck et al., 1988). Für die Konservierung im aquatischen Milieu ist offenbar die feinkörnige Rinde unabdingbar, da sie allzu schnelles Eindringen des Wassers verhindert, dessen Kapillardruck das Aggregat sprengen würde (Reimer, 1983b).

Akkretionäre Lapilli werden in der Eruptionssäule hochexplosiver, phreatoplinianischer oder rein phreatischer(?) Eruptionen gebildet, in deren Verlauf feinkörnige Asche in so hohen Massenkonzentrationen in die Atmosphäre verfrachtet wird, daß Partikel agglomeriert werden. Ihr Aufbau und ihre Korngrößenverteilung entspricht den akkretionären Lapilli aus pyroklastischen Surges. Mit ihren grobkörnigen Agglomerationskeimen und der feinkörnigeren Asche darum (nicht die Rinde!) haben sie bimodale Korngrößenverteilung. Sie werden während der turbulenten Konvektion in polydispersen Zwei-Phasen-Strömungen gebildet. Akkretionäre Lapilli weisen also auf konvektierende Eruptionssäulen hin.

Akkretionäre Lapilli, die in der Eruptionssäule über dem Schlot des Soufriere-Vulkans gebildet wurden, sind grobkörniger als der Aschenfallout. Im Fallout aus der windverdrifteten Wolke südlich des Vulkans ist das nicht der Fall: Die akkretionären Lapilli sind bei unimodaler Verteilung feinkörniger als die Falloutasche. Das bedeutet, daß in distalen Aschenwolken der grobkörnige Aschenanteil nur noch wenig Einfluß auf die Kornverteilung im Aggregat hat.

In windverdrifteten, feinkörnigen Aschenwolken, die sekundär durch Elutriation/Deflation entstanden sind, werden u.a. R_{mult} -Lapilli gebildet. Das ist theoretisch auch in Eruptionswolken möglich, wenn die Massenkonzentration der Asche groß genug ist. Man sollte bei der Untersuchung einer Ablagerung aber überprüfen, ob Elutriationswolken zu ihrer Bildung beigetragen haben könnten.

Die regionale Verbreitung von akkretionären Lapilli aus Eruptionswolken hängt von der Stärke der Eruption, der Fragmentierung, der Eruptionssäulenhöhe, der Massenkonzentration, dem Wassergehalt in der Wolke und natürlich von der Windgeschwindigkeit ab, mit der die Wolke verdriftet wird. In den Ablagerungen der Soufriere Eruption sind sie nachweislich bis 36 km verbreitet (Brazier et al., 1982), in der Hachinohe Asche nachweislich bis 50 km (Hayakawa, 1983), in der Ellensburg Formation 100 km (Schmincke, 1964; 1967) und in der Wairakei Formation Neuseelands bis 140 km (Self, 1983). Das bedeutet insgesamt, wenn die untersuchte, akkretionäre Lapilli führende Ablagerung eine Falloutasche ist, ist sie sehr wahrscheinlich während einer phreatomagmatisch-/plinianischen Eruption entstanden. Die Verbreitung

akkretionärer Lapilli gibt jedoch keinen direkten Hinweis auf die Entfernung zum möglichen Eruptionszentrum. Akkretionäre Lapilli gewährleisten auch keine sichere Identifikation der Asche als phreatoplinianischer Fallout, da ihr Interngefüge mit Surges verwechselt werden kann. Zu dieser Unterscheidung muß die Korngrößenverteilung der Falloutsche selbst bestimmt werden. Es gibt eine Reihe von Merkmalen, wie im Kapitel 8 diskutiert wurde, die eine sichere Ansprache ermöglichen, sowie relative Entfernungsangaben - proximaler, medialer, distaler Fallout - erlauben.

Bodentransportsysteme

Akkretionäre Lapilli mit grobkörnigen Partikeln im Zentrum des Kerns können auch in pyroklastischen Surges gebildet worden sein. Die Größenverteilung der Aggregate ist relativ zu pyroklastischen Strömen besser sortiert; sie steht im hydraulischen Gleichgewicht mit groben, lithischen Partikeln der Matrix. Eine feinkörnige Rinde zeigt das proximale Verbreitungsgebiet hochturbulenter Aschenwolken bis wenige km Entfernung vom Eruptionszentrum an - ca. 2.5 km am Laacher See, ca. 1.5 km in den Ablagerungen des Rieden-Vulkans (Viereck, 1984; pers.Mitt.). Die Rinde ist, bezogen auf den Gesamtdurchmesser des Lapillus, dünner als z.B. in pyroklastischen Strömen, da die Verweilzeit der Aggregate in der Surgewolke wahrscheinlich geringer ist.

In Surgeablagerungen mit ebener Parallelschichtung gibt es die typische Abfolge einer unteren, grobkörnigen Teilschicht, in der lithische Partikel angereichert sind. Darauf folgt die obere, feinaschenreiche Teilschicht mit akkretionären Lapilli. Beide Merkmale zusammen - Schichtung plus grobkörnige, in der Größe relativ gut sortierte akkretionäre Lapilli - bedeuten Surgeablagerungen.

Im Kern homogen, d.h. meist ohne Agglomerationskeim aufgebaute akkretionäre Lapilli sind in der Laacher See Tephra elliptisch geformt; im Kos-Plateau-Ignimbrit haben sie makroskopisch sichtbaren Schalenbau. Solche Aggregate stammen mit hoher Wahrscheinlichkeit aus pyroklastischen Strömen. Die nach oben aus dem Strom entweichenden, elutriierenden Gase stützen die akkretionären Lapilli während ihrer Bildung. Dadurch werden sie gewissermaßen einige Zeit in der Schwebe gehalten, was zu größeren Aggregaten führt als in Surges. Hydraulische Äquivalenzgröße zu Komponenten der Matrix spielt keine Rolle, da das angebotene Material durch die Elutriation vorsortiert ist. Die feinkörnige Rinde zeigt auch inpyroklastischen Strömen das proximale Ausbreitungsgebiet turbulenter Wolken mit noch geringem Kondensationsgrad an. C-Typ Lapilli in sehr dünngeschichteten Ignimbriten, die evtl. auch grobkörnige Partikel agglomeriert haben, deuten auf niedrig temperierte, wasserdampfreiche Bodenwolken von Eruptionen mit phreatischem Einfluß.

Allgemein ist mit akkretionären Lapilli in sehr dünngeschichteten Ignimbriten in proximaler bis medialer Overbankfazies eine Untergliederung der Sequenz in einzelne Fließeinheiten möglich, denn: Akkretionäre Lapilli sind dort am Top der Einzellagen angereichert.

Partikelgefüge

Das Gefüge mit punktförmigen oder flächenförmigen Kontakten der Aschenpartikel unterscheidet allgemein durch elektrostatische Kräfte unterstützte Anlagerung in fluidisierten/turbulenten Wolken ohne ausgeprägte Rollkomponente von turbulentem Stoßkontakt mit Rollkomponente, bei der die Partikel in die dichtestmögliche Packung eingeregelt werden. D.h. das Gefüge unterscheidet konvektierende Aschenwolken von horizontalem Bodentransport. Das sind Unterschiede im Regime horizontal gerichteter Ausbreitung.

In der Laacher See Tephra ist das lockere Partikelgefüge in R(Fall)-Lapilli entwickelt, die aus Elutriationsaschenwolken und den oberen Teilen von Surge-Wolken stammen, außerdem auch im inneren Teil der Aggregatrinden. Dichtes Partikelgefüge haben akkretionäre Lapilli, die in den unteren Teilen von Surges und Flows offenbar unter Einfluß einer Art Rollkomponente entstanden.

In der Co-blast-surge Aschenwolke der Mount St.Helens Eruption spricht die Korngrößenverteilung der akkretionären Lapilli für eine Bildung in der Elutriationswolke, das dichte Gefüge mit Schalenbau jedoch für eine ausgeprägte horizontale Bewegung.

Demzufolge gibt es offenbar einen Grenzwert horizontaler Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wolke. Möglicherweise liegt der Schwellenwert um 10 m/sec (Kap. 6.3.2): Proximale R(Fall)-Lapilli der MLST haben das lockere Gefüge und einen elliptischen Kern. Das Gefüge spricht für geringe horizontale Bewegung ohne Abrollen, der elliptische Kern jedoch für Abrollen. Die Synthese daraus könnte lauten: Rotation in Turbulenzen einer niedrig konzentrierten Aschenwolke. Dichtes Gefüge steht also für Aggregatbildung in einer dichten, hochkonzentrierten Suspension oder unter Einfluß sehr hoher Ausbreitungsgeschwindigkeit. Lockeres Gefüge steht für Aggregatbildung in einer weniger dichten Suspension und für langsamere horizontale Ausbreitung (offenbar nicht konvektiver Auftrieb) der Wolke. Sicherlich spielt auch der Wassergehalt bzw. die Fluidfilmdicke um die Partikel eine Rolle, denn in einem niedrigen Befeuchtungsstadium sollen nach Menold (1986) starre Aggregate entstehen - die Partikel haften, wie sie auftreffen.

Danksagung

Die Dissertation wurde von Herrn Prof. Hans-Ulrich Schmincke angeregt und betreut. Für seine Diskussionsbereitschaft und seine wertvollen Anregungen, vorallem aber die kritische Durchsicht des Manuskriptes in verschiedenen Stadien der Fertigstellung danke ich Ihm besonders. Während einer gemeinsamen Exkursion nach Südtalien konnte ich einige Proben zu Vergleichsanalysen sammeln.

Weitere Proben haben mir Richard Hoblitt (Cascades Volcano Observatory in Vancouver, Wash.); Haraldur Sigurdsson (University of Rhode Island); Volker Schenk (Universität Kiel); Paul van den Bogaard (Universität Bochum); Helmut Heinisch (Universität München) und Erwin Stadlbauer (Universität Freiburg) zur Verfügung gestellt.

Danken möchte ich auch meinen Diskussions- und Korrespondenzpartnern, die mir wichtige Hinweise und Informationen zu Fragen technischer Aggregatbildung gegeben haben: Herrn Dr. Schermuly (BASF-Victor, Castrop); Dr. Hoffman (BASF, Ludwigshafen); Dr. Gebhard (RWE, Essen); Dipl.Ing. Schmoll und Dipl.Phys. Simm (Bayer AG, Leverkusen).

Ganz besonders aber bin ich Herrn Buschor (GEMA AG, St.Gallen) zu Dank verpflichtet. Seinem Entgegenkommen sind die Laborexperimente zu verdanken, für die mir die GEMA ein Pulverbeschichtungsgerät zur Verfügung gestellt hat.

Ich möchte an dieser Stelle auch meine Freunde nennen, die mir in verschiedener Weise geholfen haben: Almut Fischer erledigte wie immer prompt alle Fotoarbeiten, ohne über einige "große Lappen" zu murren; Lothar Vierecks kritische Anmerkungen (als "advocatus diaboli") zu Daten, Ergebnissen und Interpretationen veranlaßten mich verschiedentlich, meine Hypothesen zu überdenken. Petra Götte "bediente" während der Laborversuche das Schüttelsieb zum Einstreuen der Asche; Karsten Otto half bei Probennahmen im Gelände, Horacio Ferriz danke ich für die Durchsicht der englischen Erläuterungen und Britta Moranz fand viele Tipfehler in meinem Manuskript.

Die Arbeit wurde finanziell durch ein Stipendium der Graduiertenförderung des Landes Nordrhein-Westfalen unterstützt. Ich danke Herrn Prof. Schmincke und Herrn Prof. Füchtbauer für die Gutachten, die mir dieses Stipendium ermöglichten. Nach Ablauf des Stipendiums leisteten meine Eltern finanzielle Hilfe, so daß ich die Arbeit ohne Verzögerung fertigstellen konnte.

Literatur

- Ames JA (1975) Cement and cement raw materials. In: SJ Lefond (Ed) Industrial minerals and rocks. Am Inst Mining Metallurgical Petroleum Engineers: 129 - 155.
- Anderson R, Björnsson S, Blanchard DC, Gatham S, Hughes J, Jonasson S, Moore CB, Survilas HJ, Vonnegut B (1965) Electricity in volcanic clouds. Science 148: 1179 - 1189.
- Baba J, Komar PD (1981) Settling velocities of irregular grains at low Reynolds numbers. J Sed Petrol 51: 121 - 128.
- Banks NG, Hoblitt RP (1981) Summary of temperature studies of 1980 deposits. In: PW Lipman, DR Mullineaux (Ed) The 1980 eruptions of Mount St. Helens, Washington. USGS Prof Paper 1250: 295 - 314.
- Bateson JH (1965) Accretionary lapilli in a geosynclinal environment. Geol Mag 102: 1 - 7.
- Beccaluva L, Gabbianelli G, Lucchini F, Rossi PL, Savelli C, Zeda D (1981) Magmatic character and K/Ar ages of volcanic drags from the Aeolian seamounts (Thyrrhenian Sea). In: FC Wezel (ed) CNR Italian Project of Oceanography (pp unknown).
- Bock R (1981) Elektrostatische Trennung der Komponenten von Kali-Rohsalzen. Chem Ing Tech 53: 916 - 924.
- Bogaard Pvd (1983) Die Eruption des Laacher See Vulkans. Dissertation Universität Bochum 1 - 348 (Maschinenschrift).
- Bogaard Pvd, Schmincke HU (1984) The eruptive center of the late Quaternary Laacher See Tephra. Geol Rundschau 73: 933 - 980.
- (1985) Laacher See Tephra: a widespread isochronous late Quaternary tephra layer in central and northern Europe. Geol Soc Am Bull 96: 1554 - 1571.
- Brazier S, Davis AN, Sigurdsson H, Sparks RSJ (1982) Fallout and deposition of volcanic ash during the 1979 explosive eruption of the Soufrière of St. Vincent. J Volcanol Geotherm Res 14: 335 - 359.
- Carey SN, Sigurdsson H (1982) Influence of particle aggregation on deposition of distal tephra from the May 18, 1980, eruption of Mount St. Helens volcano. J Geophys Res 87: 7061 - 7072.
- Charé I, Rumpf H, Schubert H (1976) Trockungsverhalten von kapillarporösen Stoffen bei Anwesenheit auskristallisierender Stoffe. Chem Ing Tech 48: 717.
- Cheng, RJ (1982) The mechanism of fine particle generation and electrification during Mount St. Helens volcanic eruption. 211 - 213.
- Cobb WF (1980) Electric fields and lightning in the Mount St. Helens volcanic cloud. EOS Trans Am Geophys Union 65: 978 (Abstract).
- Dzurisin D, Casadevall TJ (1986) Stratigraphy and chemistry of Uwekahuna Ash: product of prehistoric phreatomagmatic eruption at Kilauea Volcano, Hawaii. Abs Internat Volcanol Congress Auckland NZ abs v: 100.
- Emmerichs M, Ios E (1977) Eine verbesserte Apparatur für die Ultraschall - Mikrosiebung. Glückauf 113: 339 - 341.

- Fisher RV (1979) Models for pyroclastic surges and pyroclastic flows. *J Volcanol Geotherm Res* 6: 305 - 318.
- Fisher RV, Waters AC (1971) Base surges and their deposits: Capelinhos and Taal volcanoes. *J Geophys Res* 76: 5596 - 5614.
- Fisher RV, Heiken G (1982) Mt. Pelée, Martinique: May 8 and 20, 1902 pyroclastic flows and surges. *J Volcanol Geotherm Res* 13: 339 - 371.
- Fisher RV, Schmincke HU (1984) Pyroclastic rocks. Springer Heidelberg, pp 1 - 472.
- Fisher RV, Valentine GA (1986) Pyroclastic flows, surges, and fluidization. *Abs Internat Volcanol Congress Auckland NZ abs v: 42.*
- Fiske RS (1963) Subaqueous pyroclastic flows in the Ohanapecosh Formation, Washington. *Bull Geol Soc Am* 74: 391 - 406.
- Frazzetta G, La Volpe L, Sheridan MF (1983) Evolution of the Fossa di Volcano. *J Volcanol Geotherm Res* 17: 329 - 360.
- Freundt A, Schmincke HU (1986) Emplacement of small-volume pyroclastic flows at Laacher See (East-Eifel, Germany). *Bull Volcanol* 48: 39 - 59.
- Gillot PY, Villari L (1980) K/Ar geochronological data on the Aeolian arc volcanism. A preliminary report. *CNR Open file report*, 145, 13.
- Graup G (1981) Terrestrial chondrules, glass spherules, and accretionary lapilli from the suevite, Ries Crater, Germany. *Earth Planet Sci Lett* 55: 407 - 418.
- Harris DM, Rose WI, Roe R, Thompson MR (1981) Radar observations of ash eruptions. In: PW Lipman, DR Mullineaux (Ed) *The 1980 eruptions of Mount St. Helens, Washington*. USGS Prof Paper 1250: 323 - 333.
- Harris DM, Rose WI (1983) Estimating particle sizes, concentrations, and total mass of ash in volcanic clouds using weather radar *J Geophys Res* 88: 10969 - 10983.
- Hatakeyama H, Uchikawa K (1950) On the disturbance of the atmospheric potential gradient caused by the eruption of the volcano Aso. *J Meteor Soc Japan* 28: 456 - 462. (Zitiert in Kikuchi & Endo, 1982)
- Hay RL (1959) Formation of the crystal-rich glowing avalanche deposits of St. Vincent. *Geol* 67: 540 - 562.
- Hayakawa Y (1983) The Hachinohe ash: an example of an accretionary lapilli-fall deposit from Towado volcano, Japan. *Bull Volcanol Soc Japan* 28: 25 - 40. (Japanisch mit engl. Abstract)
- (1986) Hachinohe ash: a large-volume accretionary lapilli-fall deposit from Towado volcano, Japan. *Abs Internat Volcanol Congress Auckland NZ abs v: 103.*
- Heiken GH (1971) Tuff rings: examples from the Fort Rock - Christmas Lake Valley basin, south central Oregon. *J Geophys Res* 76: 5615 - 5626.
- Heiken GH, McCoy F (1984) Caldera development during the Minoan eruption, Thira, Cyclades, Greece. *J Geophys Res* 89: 8441 - 8462.
- Heinrichs T (1984) The Umsoli chert, turbidite testament for a major phreatoplinitic event at the Onverwacht / Fig Tree Formation (Swaziland Supergroup, Archaean, South Africa). *Precambrian Res* 24: 237 - 283.

- Heyckendorf K (1985) Die unterdevonischen Lenne-Vulkanite im nordöstlichen Rheinischen Schiefergebirge. Beiträge zu Stratigraphie, Paläogeographie, Petrographie und Geochemie. Dissertation Univ Hamburg, S 1 - 363.
- Herrmann W (1979) Verfahren und Kosten der Agglomeration. Chem Ing Tech 51: 277 - 282.
- Hobbs PV, Lyons JH (1983) Electrical activity associated with the May 18, 1980 volcanic eruption of Mount St. Helens. J Geophys Res
- Hoblitt RP, Miller CD, Vallance JW (1981) Origin and stratigraphy of the deposit produced by the May 18 directed blast. In: PW Lipman, DR Mullineaux (Ed) The 1980 eruptions of Mount St. Helens, Washington. USGS Prof Paper 1250: 401 - 419.
- Hovey EO (1902) Observations on the eruptions of the 1902 of La Soufrière, St. Vincent, and Mt. Pelée, Martinique. Am J Sci 164: 319 - 350.
- Kikuchi K, Endoh T (1982) Atmospheric electrical properties of volcanic ash particles in the eruption of Mount Usu volcano, 1977. J Meteor Soc Japan 60: 548 - 562.
- Komar PD, Reiniers CE (1978) Grain shape effects on settling rates. J Geol 86: 193 - 209.
- Lacroix A (1904) La Montagne Pelée et ses eruptions. Paris 662 pp.
- Lipman PW, Mullineaux DR (Ed) The 1980 eruptions of Mount St. Helens, Washington. USGS Prof Paper 1250: pp 1 - 844.
- Lockwood JP, Rubin M (1986) Distribution and age of the Uwekahuna Ash, Kilauea Volcano, Hawaii. Abs Internat Volcanol Congress Auckland NZ abs v: 112.
- Löffler F (1976) Möglichkeiten und Grenzen der Feinstaubabscheidung. Chem Ing Tech 48: 26 - 34.
- Lorenz V (1974) Vesiculated tuffs and associated features. Sedimentology 21: 273 - 291.
- Macdonald GA (1949) Petrography of the island of Hawaii. USGS Prof Paper 214D: 51 - 96.
- Marshall JR, Krinsley D, Greenley R (1981) An experimental study of the behaviour of electrostatically charged fine particles in atmospheric suspension. NASA Tech Memo 84211: 202 - 210.
- Mayer-Schwinning G, Rennhack R (1980) Neuere Erkenntnisse und Anwendungen bei der elektrischen Abscheidung von Stäuben und Nebeltröpfchen. Chem Ing Tech 52: 375 - 383.
- Menold R (1986) Grenzflächenphysik in der Verfahrenstechnik - Beispiele aus der Praxis. Chem Ing Tech 58: 533-539.
- Moore JG, Peck DL (1962) Accretionary lapilli in volcanic rocks of the western continental United States. J Geol 70: 182 - 193.
- Moore JG, Nakamura U, Alcaraz A (1966) The 1965 eruption of Taal volcano. Science 25: 955 - 960.
- Moore JG, Sisson TW (1981) Deposits and effects of the May 18 pyroclastic surge. In: PW Lipman, DR Mullineaux (Ed) The 1980 eruptions of Mount St. Helens, Washington. USGS Prof Paper 1250: 421 - 437.
- Mügge O (1993) Untersuchungen über die Lenneporphyre in Westfalen und den angrenzenden Gebieten. N Jb Miner Geol Paläont Beih 8: 535 - 721.

- Mumpton FA (1975) Commercial utilization of natural Zeolites. In: SJ Lefond (Ed) Industrial minerals and rocks. Am Inst Mining Metallurgical Petroleum Engineers: 1267 - 1274.
- Nelke S, Pätzold J (1981) Akkretionäre Lapilli aus dem Haupt-Vulkanit (Unterdevon) des Ebbe Sattels (Rheinisches Schiefergebirge, Blatt Meinerzhagen 4811). N Jb Geol Paläont Mh 11: 697 - 704.
- Perret FA (1913) Some Kilauean ejektamentaa Am J Sci 35: 611 - 618.
- Paluch IR (1970) Theoretical collision efficiencies of charged cloud droplets. J Geophys Res 75: 1633 - 1640.
- Ramsay JG (1967) Folding and fracturing of rocks. McGraw-Hill New York 1 - 568.
- Reh L (1982) Saubere Luft - technische Möglichkeiten, wirtschaftliche Konsequenzen. Chem Ing Tech 54: 287 - 295.
- Reimer TO (1983a) Accretionary lapilli and other spheroidal rocks from the Archaean Swaziland Supergroup, Barberton Mountainland, South Africa. In: TM Peryt (Ed) Coated grains. Springer Berlin 619 - 634.
- - - - (1983b) Accretionary lapilli in volcanic ash falls: physical factors governing their formation. In: TM Peryt (Ed) Coated grains. Springer Berlin 56 - 68.
- Rose WI Hoffman MF (1982) The May 18, 1980, eruption of Mount St.Helens: nature of the eruption, with an atmospheric perspective. In: A Deepak (Ed) Atmospheric effect and potential climatic impact of the 1980 eruptions of Mount St.Helens. NASA CP 2240: 1 - 14.
- Rose WI, Harris DM, Heiken G, Sarna-Wojcicki A, Self S (1982) Volcanological description of the 18 May eruption of Mount St.Helens. NASA Sp 458: 1 - 36.
- Rowley PD, Kuntz MA, Macleod NS (1981) Pyroclastic-flow deposits. In: PW Lipman, DR Mullineaux (Ed) The 1980 eruptions of Mount St.Helens, Washington. USGS Prof Paper 1250: 489 - 512.
- Rumpf H (1958a) Grundlagen und Methoden des Granulierens. 2. Teil: Die Festigkeit kompaktdisperser Granulatkörner. Chem Ing Tech 30: 146-158.
- - - - (1958b) Grundlagen und Methoden des Granulierens. 3. Teil: Überblick über die technischen Granulativverfahren. Chem Ing Tech 30: 329 - 336.
- - - - (1974) Die Wissenschaft des Agglomerierens. Chem Ing Tech 46: 1-46.
- Sarna-Wojcicki AM, Shipley S, Waitt RB, Dzurisin D, Wood SH (1981) Areal distribution, thickness, mass, volume, and grain-size of airfall ash from the six major eruptions of 1980. In: PW Lipman, DR Mullineaux (Ed) The 1980 eruptions of Mount St.Helens, Washington. USGS Prof Paper 1250: 577 - 600.
- Schmincke HU (1964) Petrology, paleocurrents, and stratigraphy of the Ellenburg Formation and interbedded Yakima Basalt flows, south-central Washington. PhD dissertation Johns Hopkins Univ: 1 - 426 Type-written.
- - - - (1967) Fused tufs and peperites in south-central Washington. Geol Soc Am Bull 78: 319 - 330.
- - - - (1977) Eifel-Vulkanismus östlich des Gebietes Rieden - Mayen. Fortschr Miner 55: 1 - 31.
- Schmincke HU, Fisher RV, Waters AC (1973) Antidune and chute and pool structures in the base surge deposits of the Laacher See area, Germany. Sedimentology 20: 553 - 574.

- Schubert H (1973) Kapillardruck und Zugfestigkeit von feuchten Hautwerken aus körnigen Stoffen. Chem Ing Tech 45: 396-401.
- (1975) Über Grenzflächenvorgänge in der Agglomerationstechnik. Chem Ing Tech 47: 86-94.
- (1979) Grundlagen des Agglomerierens. Chem Ing Tech 51: 266-277.
- Schumacher R (1983) Flächenfazies und Talfazies in Aschestromablagerungen der Tauchschieht (Mittlere Laacher See Tephra) am Wingertsberg bei Mendig). Dipl Arbeit Univ Bochum S 1 - 86 (Maschinenschrift).
- Schumacher R, Schmincke HU (1987) Aggregatsedimentation aus windverdrifteten Aschewolken östlich des Laacher See Vulkans. Heidelberger Geowiss Abh 8: 215 - 216 (Tagungsabstract).
- The overbank facies of ignimbrites at Laacher See Volcano. Bull Volcanol (in prepn)
- Schütz W, Schubert H (1980) Einfluß der Umgebungsfeuchte auf die Partikelhaftung. Chem Ing Tech 52: 451 - 453.
- Scrope P (1829) On the volcanic district of Naples. Geol Soc London Trans 2: 337 - 352.
- Self S (1983) Large-scale phreatomagmatic silicic volcanism: a case study from New Zealand. J Volcanol Geotherm Res 17: 433 - 469.
- Shepherd JB, Aspinall WP, Rowley KC, Pereira JA, Sigurdsson H, Fisk RS, Tomblin JF (1979) The eruption of Soufriere volcano, St.Vincent, April - June 1979. Nature 282: 24 - 28.
- Sheridan MF (1979) Emplacement of pyroclastic flows: a review. Geol Soc Am Special Paper 180: 125 - 136.
- Sigurdsson H, Carey SN The 1815 eruption of Tambora, Indonesia: generation of co-ignimbrite ash fall during entrance of pyroclastic flows into the ocean. Bull Volcanol (in prepn)
- Sigurdsson H, Carey SN, Fisher RV (1987) The 1982 eruptions of El Chichon volcano, Mexico, 3: Physical properties of pyroclastic surges. Bull Volcanol 49: 467 - 488.
- Sisson TW (1982) Sedimentary characteristics of the airfall deposit produced by the major pyroclastic surge of May 18, 1980, at Mount St.Helens, Washington. Diplomarbeit Univ Kalifornien Santa Barbara: p 1 - 145. (Maschinenschrift)
- Sorem RV (1982) Volcanic ash clusters: tephra rafts and scavengers. J Volcanol Geotherm Res 13: 63 - 71.
- Sparks RSJ (1976) Grain size variations in ignimbrites and implications for the transport of pyroclastic flows. Sedimentology 23: 147 - 188.
- Sparks RSJ, Walker, GPL (1977) The significance of vitric-enriched airfall ashes associated with crystal-enriched ignimbrites. J Volcanol Geotherm Res 2: 329 - 341.
- Sparks RSJ, Wilson L, Hulme G (1978) Theoretical modeling of the generation, movement, and emplacement of pyroclastic flows by column collapse. J Geophys Res 83: 1727 - 1739.
- Sparks RSJ, Wilson L (1982) Explosive volcanic eruptions. V. Observations of plume dynamics during the 1979 Soufriere eruption, St.Vincent. Geophys J Astron Soc 69: 551 - 570.
- Stadlbauer E, Bohla M, Keller J (1985) The Kos-Plateau-Tuff (Greece): a major ignimbrite eruption that crossed the open sea. Abs Internat Volcanol Congress Auckland NZ abs v: 75.

- Stearns HT (1925) The explosive phase of Kilauea volcano; Hawaii in 1924. *Bull Volcanol* 5: 193 - 208.
- Taylor GA (1958) The 1951 eruption of Mount Lamington, Papua. *Austr Bur Min Resour Geol Geophys Bull* 38: 1 - 117.
- Tomita K, Kanai T, Kobayashi T, Oba N (1985) Accretionary Lapilli formed by the eruption of Sakurajima volcano. *J Japan Ass Min Petrol Econom Geol* 80: 49 - 54.
- Valentine GA (1987) Stratified flow in pyroclastic surges. *Bull Volcanol* 49: 616 - 630.
- Viereck L (1984) Geologische und petrologische Entwicklung des pleistozänen Vulkankomplexes Rieden, Ost-Eifel. *Bochumer geol geotech Arb* 17: 1-337.
- Viereck LG, Taylor PN, Parson LM, Morton AC, Hertogen J, Gibbson IL & the ODP Leg 104 Scientific Party (1988) Origin of the Palaeogene Voring Plateau volcanic sequence. In: AC Morton, LM Parson (eds) *Early Tertiary volcanism and the opening of the NE Atlantic*. *Geol Soc London Special Publ* (in press).
- Voight R (1981) Time scale for the first moments of the May 18 eruption. In: PW Lipman, DR Mullineaux (Ed) *The 1980 eruptions of Mount St.Helens, Washington*. *USGS Prof Paper* 1250: 69 - 86.
- Waitt RB (1981) Devastating pyroclastic density flow and attendant air fall of May 18 - stratigraphy and sedimentology of deposits. In: PW Lipman, DR Mullineaux (Ed) *The 1980 eruptions of Mount St.Helens, Washington*. *USGS Prof Paper* 1250: 439 - 459.
- Waitt RB, Dzurisin D (1981) Proximal airfall deposits from the May 18 eruption - stratigraphy and field sedimentology. In: PW Lipman, DR Mullineaux (Ed) *The 1980 eruptions of Mount St.Helens, Washington*. *USGS Prof Paper* 1250: 601 - 616.
- Walker GPL (1973) Explosiv volcanic eruption - a new classification scheme. *Geol Rundsch* 62: 431 - 446.
- Williams H (1922) The igneous rocks of the Capel Curig District. *Liverpool Geol Soc* 13: 166 - 202.
- Wilson CJN (1980) The role of fluidization in the emplacement of pyroclastic flows: an experimental approach. *J Volcanol Geotherm Res* 8: 231 - 249.
- Wilson CJN, Walker GPL (1982) Ignimbrite depositional facies: the anatomy of a pyroclastic flow. *Geol Soc London* 139: 581 - 592.
- Wilson L (1976) Explosive volcanic eruptions - III. plinian eruptions columns. *Geophys J Roy Astron Soc* 45: 543 - 556.
- Wilson L, Huang TC (1979) The influence of shape on the atmospheric settling velocity of volcanic ash particles. *Earth Planetary Science Letters* 44: 311 - 324.
- Wohletz KH (1986) Explosive magma - water interactions: thermodynamics, explosion mechanisms, and field studies. *Bull Volcanol* 48: 245 - 264.
- Wohletz KH, Sheridan MF (1979) A model of pyroclastic surge. *Geol Soc Am Special Paper* 180: 177 - 194.

Verzeichnis Anhang

Blasen in akkretionären Lapilli

Verhältnis kleinster zu längster Durchmesser D_s/D_k

Verhältnis Kerndurchmesser zu Gesamtdurchmesser C/D

Daten der Korngrößenanalyse

C-Typ der Ignimbrite

R-Typ der Ignimbrite

R-Typ der Falloutasche in Ignimbriten
(Plinianischer Bimsfallout)

C-Typ der Surges

R-Typ der Surges

R-Typ der Ko-Surge Aschenwolken

Profil Ignimbrit der ULST

Proben der vergleichenden Analysen

Künstlicher Fallout der Experimente

Anhang

Blasen in akkretionären Lapilli

A: Anteil akkretionärer Lapilli mit Blasen in einer Probe

Akkretionäre Lapilli des MIST - B Ignimbrits

Probe:	Große Aggr.	Kleine Aggr.	Mittel
Lok. 1	95 %		
Lok. Rb	81 %	88 %	86 %
Lok. Ah		81 %	
Lok. 94	86 %		
Lok. 41	93 %	88 %	90 %
Lok. Rb	80 %		

Akkretionäre Lapilli der ULST Surges

Probe:	
Lok. 80	36 %
Lok. 83	33 %
Lok. 12a	39 %
Lok. 200	59 %
Lok. 87b	50 %
Lok. Ah	49 %
	34 %

Weitere Proben

Santorini	31 %
Hawaii	45 %

B: Blasengröße (größte gemessene Blase einer Schnittlage)

C(Flow)-Typ

Loc.: 7b	Loc.: Rb	Loc.: Ah	Loc.: 87a
Aggr. Blase (mm)	Aggr. Blase (mm)	Aggr. Blase (mm)	Aggr. Blase (mm)
8.7 0.21	6.4 0.29	6.3 0.39	6.4 0.20
7.7 0.15	6.0 0.18	5.3 0.36	5.2 0.16
7.1 0.15	5.0 0.40	4.3 0.43	4.8 0.30
6.4 0.20	4.9 0.19	4.0 0.20	4.3 0.11
4.3 0.62	4.6 0.50	3.9 0.15	3.8 0.25
4.1 0.12	3.7 0.11	3.7 0.33	3.7 0.28
3.8 0.40	3.7 0.19	2.9 0.11	3.4 0.21
3.5 0.30	3.2 0.30	2.6 0.28	3.0 0.10

R(Flow)-Typ

Loc.: 15a	Loc.: 23	Loc.: 87a	Loc.: 95
Aggr. Blase (mm)	Aggr. Blase (mm)	Aggr. Blase (mm)	Aggr. Blase (mm)
8.1 0.12	7.2 0.30	6.8 0.40	9.8 0.67
7.7 0.30	7.0 0.18	5.1 0.35	8.2 0.15
6.9 0.30	6.7 0.15	4.8 0.21	7.4 0.13
6.4 0.20	6.0 0.25	3.9 0.60	6.7 0.21
5.5 0.15	5.5 0.30	3.1 0.20	5.2 0.27
4.9 0.30	4.0 0.30	3.1 0.42	4.3 0.24
4.4 0.18	3.5 0.40	2.3 0.20	3.7 0.40
4.3 0.27	3.3 0.29	2.0 0.10	2.0 0.30

Anhang

Verhältnis Kleinster/längster Durchmesser D_s/D_l akkretionärer Lapilli

C(Flow)-Typ

Loc.: 7b Loc.: 8b Loc.: 94 (Ign. I)

Dl	D_s/D_l	Dl	D_s/D_l	Dl	D_s/D_l
(mm)		(mm)		(mm)	
9.5	0.43	7.8	0.49	9.5	0.46
7.9	0.51	7.0	0.57	7.3	0.47
7.1	0.65	6.9	0.55	7.0	0.43
6.5	0.57	6.7	0.67	6.8	0.54
6.0	0.75	6.4	0.63	6.0	0.60
5.9	0.66	5.9	0.63	5.5	0.64
4.6	0.77	5.6	0.73	5.3	0.70
4.3	0.83	5.3	0.72	4.2	0.76
3.6	0.93	4.9	0.78	4.1	0.78
3.2	0.88	4.6	0.76	3.5	0.89
4.0	0.75	4.0	0.75	3.2	0.81
3.0	1.00	3.8	0.89	2.9	0.88

R(Flow)-Typ

Loc: 23

Kern Loc.: 95 (Ign. II)

Gesamtlap.			Kern			Gesamtlap.		
Dl	D_s/D_l	Dl	D_s/D_l	Dl	D_s/D_l	Dl	D_s/D_l	Dl
(mm)		(mm)		(mm)		(mm)		(mm)
7.0	0.60	10.3	0.78	14.6	0.45	16.7	0.60	
6.2	0.69	8.7	0.86	9.1	0.45	10.7	0.76	
6.0	0.98	8.6	0.78	8.5	0.53	11.1	0.68	
5.8	0.87	7.8	0.79	7.5	0.35	10.6	0.71	
5.5	0.76	7.4	0.84	7.4	0.53	9.8	0.65	
5.5	0.82	8.2	0.89	7.1	0.70	10.3	0.79	
5.5	0.80	6.4	0.92	6.7	0.60	8.2	0.78	
4.2	0.57	7.5	0.81	6.2	0.65	8.3	0.81	
4.0	0.72	7.6	0.80	5.6	0.68	7.6	0.88	
3.7	0.76	5.9	0.85	5.0	0.60	7.0	0.80	
3.7	0.84	5.7	0.84	4.5	0.69	7.2	0.76	
3.2	0.94	5.0	0.98	3.7	0.81	5.5	0.92	

Loc.: 94 (Ign. II)

Gesamtlap.			Kern		
Dl	D_s/D_l	Dl	D_s/D_l	Dl	D_s/D_l
(mm)		(mm)		(mm)	
10.4	0.38	13.4	0.59		
8.4	0.65	10.4	0.71		
7.5	0.47	10.7	0.71		
7.1	0.49	9.3	0.75		
7.0	0.53	9.2	0.79		
6.6	0.47	8.7	0.77		
6.5	0.54	8.5	0.89		

R(Fall)-Typ

Loc.: 15b

Gesamtlap.			Kern			Gesamtlap.		
Dl	D_s/D_l	Dl	D_s/D_l	Dl	D_s/D_l	Dl	D_s/D_l	Dl
(mm)		(mm)		(mm)		(mm)		(mm)
8.7	0.75	11.1	0.82	10.1	0.72	12.5	0.78	
7.4	0.47	10.3	0.73	8.0	0.75	11.8	0.89	
6.9	0.71	8.8	0.93	7.8	0.84	10.8	0.80	
6.4	0.63	8.6	0.70	7.3	0.59	9.8	0.74	
6.2	0.53	7.8	0.71	7.0	0.71	9.2	0.75	
5.7	0.61	7.6	0.89	6.5	0.65	8.8	0.80	
5.5	0.73	7.3	0.74	6.3	0.59	7.9	0.70	
5.1	0.61	6.6	0.76	6.2	0.69	8.2	0.77	
4.9	0.61	6.6	0.86	5.8	0.67	10.0	0.80	
4.3	0.70	6.1	0.85	5.4	0.65	8.2	0.71	
3.6	0.72	5.7	0.82	5.0	0.60	8.7	0.76	
2.4	0.92	4.8	0.92	4.1	0.73	6.0	0.75	

Anhang

Verhältnis Kerndurchmesser C / Gesamtdurchmesser D

R(Flow)-Typ

Loc.: 94			Loc.: 95			Loc.: 23			Loc.: 87a		
D	C/D	(mm)	D	C/D	(mm)	D	C/D	(mm)	D	C/D	(mm)
11.7	0.88		16.7	0.87		8.2	0.67		7.2	0.58	
10.2	0.76		10.7	0.85		7.8	0.64		6.7	0.67	
9.5	0.75		9.7	0.76		7.4	0.64		6.3	0.51	
8.7	0.76		8.3	0.77		6.4	0.70		6.0	0.55	
8.6	0.81		8.0	0.75		6.0	0.67		5.5	0.45	
7.7	0.71		7.7	0.71		5.6	0.70		5.1	0.54	
7.0	0.71		7.6	0.59		5.4	0.63		4.8	0.54	
6.9	0.59		6.4	0.61		4.5	0.67		4.3	0.47	
6.0	0.67		5.8	0.72		4.4	0.59		3.7	0.51	
5.8	0.69		4.2	0.67		3.7	0.59		3.6	0.44	

R(Fall)-Typ

Loc.: 15b			Loc.: 94		
D	C/D	(mm)	D	C/D	(mm)
11.0	0.89		13.5	0.82	
10.0	0.73		10.8	0.72	
9.1	0.82		9.9	0.74	
8.5	0.75		8.5	0.76	
7.1	0.73		7.4	0.70	
6.1	0.70		7.3	0.78	
5.7	0.63		6.4	0.70	
4.8	0.63		6.0	0.68	
4.2	0.57		5.5	0.73	
4.0	0.57		5.3	0.68	

R(Surge)-Typ

Loc.: 1			Loc.: 83			Loc.: 12a			Loc.: 83		
D	C/D	(mm)	D	C/D	(mm)	D	C/D	(mm)	D	C/D	(mm)
5.0	0.73		3.1	0.51		4.3	0.73		4.3	0.73	
5.0	0.66		4.3	0.58		4.3	0.69		4.3	0.69	
5.2	0.69		4.2	0.77		4.2	0.65		4.2	0.65	
4.6	0.78		4.2	0.86		4.2	0.65		4.2	0.65	
4.4	0.68		3.8	0.82		3.8	0.73		3.8	0.73	
4.0	0.55		3.5	0.66		3.5	0.75		3.5	0.75	
3.5	0.71		3.1	0.48		3.5	0.68		3.1	0.48	
3.5	0.77		2.8	0.71		3.0	0.67		3.0	0.67	
2.8	0.71		2.6	0.62		2.9	0.70		2.6	0.62	
2.5	0.76		2.5	0.68		2.8	0.64		2.5	0.68	

R(Fall)-Typ

Loc.: 12a			Loc.: 200			Weibern			Pompeji		
D	C/D	(mm)	D	C/D	(mm)	D	C/D	(mm)	D	C/D	(mm)
7.7	0.81		6.3	0.84		9.5	0.79		13.3	0.78	
7.4	0.81		5.8	0.79		7.7	0.71		10.2	0.78	
7.0	0.83		7.7	0.82		7.0	0.71		9.1	0.89	
7.0	0.74		5.5	0.75		6.8	0.66		8.0	0.75	
6.8	0.88		5.2	0.81		5.5	0.69		7.7	0.77	
6.8	0.76		5.0	0.76		5.6	0.71		7.2	0.64	
6.3	0.75		4.6	0.70		5.1	0.69		6.6	0.76	
5.5	0.87		4.5	0.82		4.8	0.69		5.6	0.75	
5.0	0.68		4.0	0.75		3.9	0.64		5.3	0.70	
						2.2	0.56		4.3	0.67	

[illegible][illegible]

Probe: Lok. 94 (Ignimbrit II)

Frakt.	Trägersch.	Kern	Rinde	Lok. 78 (LUST I)	
(mm)				Trägersch.	Kern
		Gewichts - %			
> 4.000				1.01	
2.800				1.89	
2.000				8.07	0.58
1.410	2.59				0.93
0.710	2.21			15.22	2.39
0.500	2.65				2.73
0.350	2.87			13.30	5.49
0.250	2.81	1.44		8.38	6.71
0.180	4.68	5.55			6.38
0.125	4.10	6.48	1.51		6.38
0.090	4.73	8.22	2.46		7.58
0.063	5.78	8.91	4.63	10.17	7.58
0.045	4.55	11.38	4.17		6.84
0.030	8.96	14.33	7.03	6.32	6.02
0.020	9.03	10.78	10.40		6.19
0.015	7.54	6.22	6.04		7.43
0.010	11.22	9.27	16.64	12.12	8.45
0.005	8.92	6.73	17.34	17.33	23.42
< 0.005	17.37	10.16	30.07		
Median	5.4/25	5.9/37	/11	3.2/100	5.0/30
(Phi/mm)				3.9	2.9
Sortierung	2.7	1.75	1.9		
(Inman)					

Aschenfallout und akkretionäre Lapilli

Probe: Lok. 15b

Frakt.	Aschenfall	Kern	Rinde	Lok. 94	
(mm)				Aschenfall	Kern
		Gewichts - %			
> 0.250	(3.80)	0.61		0.70	0.67
0.180	1.93	0.84		--	0.90
0.125	2.69	3.45	0.78	3.26	1.90
0.090	3.79	4.69	1.54	--	6.05
0.063	4.92	7.08	3.29	7.88	8.32
0.045	9.87	13.29	2.87	--	17.44
0.030	12.61	14.42	6.54	14.61	13.01
0.020	11.89	13.70	9.82	12.38	11.86
0.015	6.55	4.77	6.48	8.09	9.55
0.010	14.38	11.21	17.84	15.63	9.13
0.005	11.09	9.23	18.60	16.76	6.83
< 0.005	17.17	16.71	32.24	21.50	14.35
Median	20	26	10	--	30
(µm)					
Sortierung	1.6	1.6	1.7		1.7
(Inman)					

Probe: Lok. 23

Frakt.	Trägersch.	Kern	Rinde	Lok. 95 (Ignimbrit II)	
(mm)				Trägersch.	Kern
		Gewichts - %			
> 4.000	3.18				
2.800	2.55				
2.000	2.39				
1.410	3.73				
0.710	2.60				
0.500	2.19				
0.350	2.14				
0.250	1.57				
0.180	1.46	2.67			
0.125	2.37	1.39			
0.090	2.57	6.12			
0.063	3.25	6.13	1.12		
0.045	5.48	11.39	1.20		
0.030	4.49	13.24	2.93		
0.020	9.69	13.85	7.23		
0.015	10.26	11.54	9.80		
0.010	6.48	4.51	17.44		
0.005	9.76	9.57	13.16		
< 0.005	13.69	11.08	35.15		
Median	5/30	4.9/37	/10	5.25/26	4.8/35
(Phi/µm)					
Sortierung	3.5	1.7	1.7	2.75	1.6
(Inman)					

Plinianischer Lapilli-Fallout der MUST E' Laacher See

Frakt.	Lok. NE	Lok. Bh	Lok. Kb	Lok. And	Lok. NWg
(mm)					
		Gewichts - %		Gewichts - %	
> 32.000					
16.000	2.56				
8.000	8.18		0.55		
4.000	19.31	7.05	10.81	3.06	2.04
2.000	32.47	14.16	20.57	8.52	7.44
1.000	21.31	29.31	31.24	26.54	20.18
0.500	13.11	30.94	19.39	33.02	26.79
0.250	11.20	15.00	8.69	22.73	23.60
0.125	2.96	3.54	1.96	6.15	16.79
Median	2.8	---	2.6	1.6	---
(mm)					
Sortierung	1.1	---	1.3	1.1	---
(Inman)					

R-Typ Lapilli der Fallout-Aschen

Probe: Andernach (And)				Neuwied-Gladbach (NWG)				Probe: Lok. 95				Lok. NE			
Aschenfall		Kern	Rinde	Aschenfall		Kern	Rinde	Aschenfall		Kern	Rinde	Aschenfall		Kern	Rinde
		Gewichts - %													
Frakt.				Frakt.				Frakt.				Frakt.			
(mm)				(mm)				(mm)				(mm)			
> 0.250	0.50				1.17			> 0.250	0.60				0.53	0.70	
0.125	0.35				1.20			0.180	0.72				0.75	0.54	
0.150	1.44				2.26			0.125	1.30				1.63	0.64	0.34
0.180	1.73	0.80			4.74			0.090	3.43				2.06	2.80	1.70
0.250	6.89	1.84		1.83	4.56	5.38		0.063	7.18	3.37			5.66	4.45	2.48
0.300	9.09	2.70		4.86	8.56	13.26		0.045	14.30	4.85			8.19	7.40	2.16
0.350	11.25	1.90		10.92	13.26	5.21		0.030	14.17	4.89			13.11	9.96	5.73
0.400	11.25	5.21		10.92	13.26	5.21		0.020	15.74	9.92			15.47	9.63	5.13
0.450	18.95	13.71		20.01	10.36	4.40		0.015	16.02	4.40			15.87	10.45	5.17
0.500	13.71	23.02		15.56	13.35	10.36		0.010	12.48	16.60			17.41	10.41	19.19
0.600	27.28	23.02		16.21	11.74	17.53		0.005	8.97	19.88			17.34	18.40	19.11
< 0.005	23.60	23.27	44.80	26.03	17.53			< 0.005	14.50	32.74			21.42	27.26	44.84
Median	---	19	6	13	20			Median	---	---	---		17	13	F
(µm)								(Phi/mm)							
Sortierung		1.9	1.7	1.8	1.7			Sortierung	---	---	---		1.7	1.7	---
(Inman)								(Inman)							
Probe: Lok. Irlich (Ir)				Lok. Weißenthurm (WP)				Probe: Lok. Bürgerhaus (Bh)				Krahenberg (Kb)			
Aschenfall		Gewichts - %		Aschenfall		Gewichts - %		Aschenfall		Gewichts - %		Aschenfall		Gewichts - %	
Frakt.				Frakt.				Frakt.				Frakt.			
(mm)				(mm)				(mm)				(mm)			
> 0.250	(1.84)				0.50			> 0.250	0.50				0.40	0.70	
0.180	0.180				0.68			0.180	0.74				---	---	
0.125	4.69				1.36			0.125	1.41				3.74	1.58	0.30
0.090	---			0.64	0.690			0.090	4.75	1.50			---	---	
0.063	9.49			2.33	7.23			0.063	6.97	2.66			---	---	
0.045	4.62			4.40	8.41			0.045	8.41	3.78			9.40	10.70	8.18
0.030	11.56			5.14	12.71			0.030	16.24	5.95			3.65	6.95	5.78
0.020	---			11.27	0.630			0.020	12.71	16.24			9.43	14.07	11.90
0.015	16.94			9.54	0.610			0.015	20.38	---			9.13	---	---
0.010	---			8.84	0.610			0.010	21.18	13.37			5.29	17.94	23.03
0.005	27.69			15.24	0.005			0.005	25.45	30.32			29.51	24.10	25.23
< 0.005	23.23			16.93	< 0.005			< 0.005	17.20	42.05			28.64	23.96	44.80
Median	15			25.00	Median			Median	---	---	---		---	---	
(µm)					(µm)			(µm)							
Sortierung	1.95			1.8	Sortierung			Sortierung	1.9	1.7			---	2.0	---
(Inman)					(Inman)			(Inman)							

Probe: Lok. 80				Lok. 83				Lok. 1				Lok. 6c			
Frakt.	Trägersch.	Kern	Rinde	Frakt.	Trägersch.	Kern	Rinde	Frakt.	Trägersch.	Kern	Rinde	Frakt.	Trägersch.	Kern	Rinde
(mm)				(mm)				(mm)				(mm)			
> 4.000	3.14			> 4.000	2.84			> 4.000	7.69			> 4.000	2.55		
2.800	6.00			2.800	4.61			2.800	11.84			2.800	7.37		
2.000				2.000				1.410				1.410			
1.410				1.410				1.000				1.000			
1.000	12.44	3.23		0.710	9.71	3.64		0.710	14.29	5.98		0.710	15.46	4.58	
0.500	20.30	2.33		0.350	17.00	3.83		0.500		2.72		0.500		3.79	
0.350		1.51		0.250	17.00	2.91		0.350	9.01	1.93		0.350	18.08	1.82	
0.250		1.02		0.180	14.20	2.84		0.250		--		0.250		1.40	
0.180		1.30		0.160	14.20	1.63		0.180	4.72	3.38		0.160	6.34	1.15	
0.138		3.18	1.38	0.120	7.62	3.20	2.55	0.138		2.04		0.120		1.15	
0.090		6.67	3.15	0.080	7.16	4.52		0.090	4.11	3.67	2.59	0.080	3.34	2.68	0.62
0.063	4.72	7.19	3.41	0.060	6.11	8.08	6.12	0.063	6.46	6.54	5.51	0.060	4.63	4.63	2.13
0.045	9.44	2.86	8.09	0.040	9.91	9.91	7.47	0.045		9.35	5.66	0.040	5.95	7.25	2.91
0.030	4.07	11.67	8.09	0.030	7.90	9.50	9.69	0.030	8.86	9.13	7.26	0.030	10.60	6.57	
0.020		10.14	--	0.020	8.34	7.74	10.88	0.020		6.35	11.42	0.020	11.36	9.42	
0.015	6.81	6.38	13.52	0.010	12.24	9.27	10.42	0.015	10.07	7.94	9.07	0.010	10.09	8.65	8.34
0.010	11.47	9.49	14.56	0.010	12.24	8.27	13.13	0.010		8.30	11.68	0.010	8.11	10.64	
0.005	10.20	19.04	19.04	0.005	9.51	8.36	13.74	0.005	12.52	8.60	13.96	0.005	13.56	8.84	10.94
< 0.005	10.03	12.99	33.80	< 0.005		13.66	21.47	< 0.005	9.70	13.39	23.15	< 0.005	9.39	16.35	27.92
Median	1.6/330	5.0/30	6.9/9	Median	2.2/218	4.9/34	1/6	Median	2.5/180	4.7/39	6/16	Median	2.0/250	5.2/28	6.4/12
(Phi/mm)				(Phi/mm)				(Phi/mm)				(Phi/mm)			
Sortierung	3.25	2.1	1.9	Sortierung	3.33	2.28	1.9	Sortierung	3.75	2.43	2.0	Sortierung	3.60	2.25	1.90
(Inman)				(Inman)				(Inman)				(Inman)			

Probe: Lok. 87b				Lok. 87b				Lok. 83				Lok. 12a			
Frakt.	Trägersch.	Kern	Rinde	Frakt.	Trägersch.	Kern	Rinde	Frakt.	Trägersch.	Kern	Rinde	Frakt.	Trägersch.	Kern	Rinde
(mm)				(mm)				(mm)				(mm)			
> 4.000	1.45			> 4.000	1.18			> 4.000	0.85			> 4.000	1.62		
2.800				2.800	4.66			2.800				2.800			
2.000	4.82			2.000				2.000	4.70			2.000	4.54		
1.410				1.410				1.410				1.410			
1.000	10.03	2.42		1.000	12.34	2.48		1.000	10.90	4.41	2.38	1.000	9.68	3.56	
0.710		2.87		0.710	23.38	4.02		0.710		3.60	2.12	0.710		3.09	
0.500	17.57	2.81		0.500		3.38		0.500	21.02	2.58	1.34	0.500	15.46	2.80	
0.350	9.91	2.91		0.350	14.44	3.72		0.350		2.32	3.06	0.350		2.17	
0.250		2.81		0.250		4.39		0.250	14.83	3.09	3.69	0.250		1.93	
0.180	3.48	5.27		0.180	7.33	5.27		0.180		3.04	8.58	0.180		1.50	
0.125	8.11	5.71		0.125	10.24	8.12		0.125	7.74	3.38	9.16	0.125		2.27	
0.090		8.26		0.090	7.63	9.58		0.090		0.62	12.18	0.090		6.75	
0.063	10.89	10.18		0.063		8.60		0.063	7.10	10.55	9.36	0.063		5.31	
0.045		11.01		0.045	8.06	7.10		0.045	8.30	10.55	9.36	0.045		9.87	
0.030	9.73	9.33		0.030		8.60		0.030		6.99	6.16	0.030		5.56	
0.020		3.85		0.020	5.94	7.10		0.020		6.99	6.16	0.020		--	
0.015	8.89	3.85		0.015		3.19		0.015	6.73	5.51	5.24	0.015		15.97	
0.010		7.09		0.010	7.96	6.08		0.010		7.40	5.27	0.010		--	
0.005	10.28	6.59		0.005	7.42	5.22		0.005	9.18	6.63	7.13	0.005		1.94	
< 0.005	8.30	10.76		< 0.005		8.80		< 0.005	8.66	10.18	9.97	< 0.005		1.46	
Median	2.75/150	4.6/40		Median	1.9/268	4.35/49	4.2/54	Median	1.9/268	4.35/49	4.2/54	Median	2.0/250	5.2/27	
(Phi/mm)				(Phi/mm)				(Phi/mm)				(Phi/mm)			
Sortierung	3.1	2.4		Sortierung	3.0	2.18	2.1	Sortierung	3.0	2.18	2.1	Sortierung	3.4	2.2	
(Inman)				(Inman)				(Inman)				(Inman)			

Analysen ohne Vergleich zur Trägerschicht

Probe: Lok. 80 Lok. 80 Lok. 80 Lok. 200 Lok. 87b
Frakt. Gewichts - % Gewichts - %

> 4.000	9.38	6.03	4.34	9.26	5.88	1.26
2.800	2.30	3.08	1.37	5.22	3.28	2.33
2.000	2.90	4.17	1.65	4.42	3.02	3.09
1.410	2.72	4.04	1.69	4.33	2.31	3.65
1.000	4.55	7.12	2.92	6.15	4.42	3.98
0.710	7.63	9.81	5.33	8.63	6.62	8.25
0.500	7.86	9.23	5.54	8.53	6.34	8.74
0.350	10.03	8.00	7.88	8.34	8.74	8.94
0.250	9.32	10.12	10.26	9.38	7.49	10.55
0.180	8.29	8.75	10.05	5.47	4.97	7.42
0.090	3.39	4.33	4.78	5.20	4.20	4.81
0.045	7.43	9.78	8.35	6.41	5.02	7.74
0.025	8.43	7.16	9.50	6.95	12.04	7.93
< 0.005	14.70	10.97	16.28	11.72	25.17	10.99
Median						
(Phi/mm)	4.5/45	4.3/53	5.3/25	4.0/53	5.0/30	4.5/45
Sortierung	2.8	2.3	2.2	2.7	2.5	2.3
(Innan)						

Fall-Lapilli der ULST - Surges

Probe:	Lok. 80	Lok. 12a	Lok. 200
Frakt. (mm)	Kern Rinde	Kern Rinde	Kern Rinde
Gewichts - %	Gewichts - %	Gewichts - %	Gewichts - %
> 0.250	2.05	1.02	1.67
0.180	0.99	0.72	0.87
0.125	1.95	2.25	2.34
0.090	6.66	1.42	0.73
0.063	7.43	7.68	4.26
0.045	9.15	11.83	4.61
0.030	15.26	11.21	8.97
0.020	18.60	6.07	10.41
0.015	8.00	10.22	6.10
0.010	11.41	15.22	10.00
0.005	9.98	13.65	8.90
< 0.005	13.76	8.99	11.50
Median	23	9	11.50
(µm)			
Sortierung	1.7	1.9	1.6
(Innan)			

Probe: Lok. 83	ULST - Ignimbrit	Elutriation Lapillus
Frakt. (mm)	Ignimbrit Segregation	Gewichts - %
> 4.000	5.23	1.45
2.800	5.90	4.28
2.000	7.66	6.09
1.410	12.12	9.87
1.000	18.78	14.90
0.710	15.00	16.53
0.500	12.39	14.94
0.350	8.56	15.39
0.250	5.64	7.09
0.180	4.97	5.52
0.125	3.76	3.80
0.090	2.0/250	2.9/130
0.063	Median	5.0/30
0.045	(Phi/mm)	5.2/28
0.030	Sortierung	2.5
0.020	(Innan)	2.3
0.015		1.9
0.010		2.0
0.005		
< 0.005		

Probe: Monte Pelato			
Frakt.	Trägersch.	Kern	Rinde
(mm)	Gewichts - %		
	Trägersch.	Kern	Rinde
	Gewichts - %		
	[Surge]		
	[Flow]		
> 4.000	1.52		
2.800			0.83
2.000	4.10		1.49
1.410			
1.060	6.95	3.67	
0.710	8.90	0.82	2.50
0.500	9.04	1.11	
0.350	18.50	2.26	3.15
0.250	9.29	2.11	
0.180	16.70	2.84	
0.125	10.38	6.55	1.06
0.090	10.21	10.21	5.53
0.063	16.51	9.97	0.92
0.045		11.00	3.90
0.030	15.86	15.13	5.98
0.020		12.73	7.18
0.015		---	10.58
0.010	10.46	7.12	15.45
0.005	7.04	6.99	12.15
0.005	6.30	16.79	15.51
0.005	2.0	13.08	7.07
Median	3.5/88	4.5/45	13.28
(Phi/mm)			15.48
Sortierung	2.8	2.1	5.1/29
(Inman)			10
Median	3.6/83	4.5/45	4.6/41
(Phi/mm)			2.5
Sortierung	3.5	2.8	1.9
(Inman)			9

Probe:	Hawaii (Uwekahuna Asche)	Pompeji
	Trägersch. Kern Rinde	Trägersch Kern Rinde
	Gewichts - %	Gewichts - %
Frakt. (mm)		
> 4.000	0.72	1.06
2.800		2.800
2.000	2.15	4.64
1.410		1.410
1.000	3.99	9.20
0.710		1.19
0.500	4.89	0.560
0.350	0.48	0.350
0.250	7.99	0.250
0.180		0.180
0.125	14.61	0.125
0.090		0.090
0.063	19.02	0.063
0.030	12.83	0.030
0.020	10.02	0.020
0.015	10.71	0.015
0.010	10.71	0.010
0.005	14.69	0.005
0.005	10.82	0.005
Median (Phi/mm)	3.85/73	4.25/53
Sortierung	2.1	1.5
(Inman)		

Probe: Mount St.Helens directed blast surge

Frakt. (mm)	Trägersch. Kern	Kern Gewichts - %	Trägersch. Kern	Kern Gewichts - %	(Elutriation)	(FLOMS)
> 4.000						
2.800						
2.000	1.19				0.82	0.53
1.410	2.05				1.70	1.07
1.000	2.73				2.43	1.27
0.710	1.94				3.92	2.60
0.500	0.95	2.02	2.90		8.41	6.70
0.350	0.92	0.87	1.06		9.21	11.03
0.250	1.23	1.78	1.69		9.59	9.70
0.180	2.23	2.88	2.94		10.81	10.81
0.125	4.50	4.03	3.90		9.94	10.81
0.090	6.24	9.44	7.76		9.75	12.41
0.063	9.62	12.57	10.86		6.77	18.28
0.045	8.39	10.77	11.28		10.01	11.81
0.030	10.99	13.23	9.62		25.75	25.28
0.020	10.32	6.80	7.36		---	---
0.015	7.40	4.74	6.82		5.2/27	5.25/26
0.010	9.38	9.03	10.17		2.3	2.1
0.005	24.70	21.93	23.63		2.0	2.0
< 0.005	---	---	---			
Median (Phi/mm)	4.8/36	4.8/37	4.8/37			
Sortierung (Inman)	1.8	1.5	1.5			

Probe: Taupo (1. Probe)	(2. Probe)
Trägersch. Gewichts - %	Trägersch. Gewichts - %
Frakt. (mm)	Frakt. (mm)
> 4.000	> 4.000
2.800	2.800
2.000	2.000
1.410	1.410
1.000	1.000
0.710	0.76
0.500	3.65
0.350	12.04
0.250	0.58
0.180	1.04
0.125	17.82
0.090	6.49
0.063	11.20
0.045	12.59
0.030	13.57
0.020	---
0.015	16.75
0.010	19.21
0.005	14.23
< 0.005	20.73
Median (Phi/mm)	17.02
Sortierung (Inman)	20.12
	5.2/27
	5.4/23
	2.9
	2.0
	2.1
	2.0
	1.9

5.4/24 6.0/15

23.32 24.66

16.26 22.14

18.17 21.71

13.19 11.50

9.15 5.49

10.65 5.60

7.03 3.54

1.54 1.16

0.70 0.70

Korngrößenverteilung des künstlichen Aschenfallouts der Experimente zum elektrostatischen Verhalten vulkanischer Asche.

Probe: Versuch mit 25 kV Spannung

Frakt. (mm)	Lag fall	in 30 cm	in 50 cm	Platte	Primärsche
> 0.180	16.10	2.23	—	—	12.27
> 0.125	20.50	5.77	—	—	14.31
0.090	10.74	6.79	—	—	11.91
0.063	9.17	20.02	21.73	0.71	9.97
0.045	5.92	12.36	11.87	11.72	8.46
0.030	8.26	14.78	16.37	26.42	7.86
0.020	7.40	12.78	11.30	19.39	7.82
0.010	10.42	15.52	13.99	22.43	11.90
< 0.010	11.42	16.53	16.45	20.06	13.41

Probe: Versuch mit 70 kV Spannung

Frakt. (mm)	Lag fall	in 30 cm	in 50 cm	Platte	Primärsche
> 0.180	—	0.44	—	—	12.27
> 0.125	—	8.24	3.67	—	14.31
0.090	—	10.54	8.94	0.07	11.91
0.063	—	24.14	18.11	5.19	9.97
0.045	—	6.16	9.34	9.71	8.46
0.030	—	13.56	16.07	18.71	7.82
0.020	—	10.43	11.74	18.47	11.90
0.010	—	13.20	15.95	25.06	13.41
< 0.010	—	13.27	16.17	22.82	—

Probe: Versuch mit 50 kV Spannung

Frakt. (mm)	Lag fall	in 30 cm	in 50 cm	Platte	Primärsche
> 0.180	26.48	0.39	—	—	12.27
0.125	27.45	4.30	1.11	0.38	14.31
0.090	11.54	9.95	5.42	0.78	11.91
0.063	9.94	22.86	19.26	7.53	9.97
0.045	4.12	7.15	12.60	12.58	8.46
0.030	5.26	13.12	16.66	21.06	7.86
0.020	4.61	12.89	12.10	16.70	7.82
0.010	5.77	15.58	16.36	19.82	11.90
< 0.010	5.36	13.83	16.48	19.18	13.41
Median	2.9/0.13	3.7/.077	4.9/.035	5.3/.027	4.1
Sortierung	1.23	1.45	1.4	1.3	1.8

Tabellarischer Lebenslauf

Rolf Schumacher

- | | |
|------------|--|
| 23. 4.1957 | Geboren in Langenei (jetzt Lennestadt) als Sohn des Bundesbahnbeamten Heinz Schumacher und seiner Ehefrau Herta |
| 1960 | Umzug nach Altenhundem (jetzt Lennestadt)
dort |
| 1. 4.1963 | Einschulung in die Grundschule |
| 1. 8.1967 | Wechsel zum privaten, altsprachlichen Gymnasium <i>Maria Königin</i> in Altenhundem
dort |
| 23. 6.1976 | Abschluß der schulischen Ausbildung mit dem Abitur |
| 1. 7.1976 | Ableistung des Grundwehrdienstes |
| 1.10.1977 | Beginn des Studiums der Geologie an der <i>Ruhr-Universität</i> in Bochum
dort |
| 7. 6.1984 | Abschluß des Studiums mit dem Grad eines Diplom Geologen |
| 1984 | Herbst des Jahres, Beginn der Arbeiten zur Dissertation am Institut für Mineralogie; Stipendium zur Graduiertenförderung des Landes Nordrheinwestfalen |
| 1985 | Umzug nach Bochum |
| April 1988 | Vorlage der Dissertationsschrift bei der Fakultät für Geowissenschaften an der Ruhr-Universität |
| Juli 1988 | Disputation |

FOTODRUCK J. MAINZ GmbH
Neupforte 13, Nahe Markt, D-5100 Aachen
Telefon: (0241) 27305 und (0241) 38606